

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

**Posouzení provozu hořáku zemního plynu z hlediska produkce emisí a
vlivu přebytku vzduchu na spalovací proces**

Assessment of the Operation of the Gas Burner in Term of Emissions
Production and Influence of the Excess Air on Combustion

Student:

Bc. Matěj Dobner

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Stanislav Honus, Ph. D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Matěj Dobner**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: Posouzení provozu hořáku zemního plynu z hlediska produkce emisí a
vlivu přebytku vzduchu na spalovací proces
Assessment of the Operation of the Gas Burner in Terms of Emissions
Production and Influence of the Excess Air on Combustion Process

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši o využívání zemního plynu jakožto zdroje energie pro spalovací zařízení.
2. Popište fyzikální a chemickou podstatu procesu hoření plyných paliv vč. problematiky tvorby emisí.
3. Určete chemické a fyzikální vlastnosti tranzitního zemního plynu zadaného složení.
4. Proveďte konstrukční návrh nízkotlakého hořáku ZP v několika variantách (výkon cca 8 kW).
5. Připravte plán experimentů pro posouzení provozu navrženého hořáku z hlediska produkce plyných emisí, teplotního pole ve spalovacím prostoru a teploty a toku odpadních spalin.
6. Zrealizujte navržený experiment a na základě získaných dat posuďte provoz hořáku.

Seznam doporučené odborné literatury:

GLASSMAN, I. YETTER, R. *Combustion*. 4 edition. Academic Press, 2008. 800 s. ISBN 978-0-12-88573-2.
NOSKIEVIČ, P. *Spalování uhlí*. 2. vydání. VŠB - TUO, 2005. 66 s. ISBN 80-248-0204-X.
RAJNIAK, I. *Tepelnoenergetické a emisné merania*. Ister Science, 1997, 481 s. ISBN 80-88683-20-3.
RÉDR, M., PŘÍHODA, M. *Základy tepelné techniky*. 1. vydání. SNTL, 1991. 680 s. ISBN 80-03-00366-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Honus, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16. 5. 2016


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Matěj Dobner

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Topolová 1508

Bystřice pod Hostýnem

76861

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Dobner, M. *Posouzení provozu hořáku zemního plynu z hlediska produkce emisí a vlivu přebytku vzduchu na spalovací proces: Diplomová práce*, Ostrava: Katedra energetiky, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016, 62s, Diplomová práce, vedoucí: Ing. Stanislav Honus, Ph. D.

Diplomová práce se zabývá návrhem a posouzením provozu hořáku na zemní plyn zejména z hlediska produkce emisí. Práce je rozdělena do dvou částí. První část pojednává o teoretických aspektech spalovacích procesů, jednotlivých druzích plynových hořáků a vlastnostech zemního plynu. Druhá část je věnována výpočtu spalovacích vlastností zemního plynu, stechiometrii, a návrhu tří konstrukčních variant hořáku s ohledem na požadované podmínky. Závěrečná část se zaměřuje na posouzení provozu navrženého hořáku na základě provedených experimentálních testů.

Klíčová slova: zemní plyn, spalovací zařízení, hořák

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Dobner, M. *Assessment of the Operation of the Gas Burner in Term of Emissions Production and Influence of the Excess Air on Combustion Measurements: Master Thesis*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Engineering, Department of Energy 2016, 62s, thesis supervisor: Ing. Stanislav Honus, Ph. D.
Master thesis

This thesis describes the design and assessment of the operation of the burner for natural gas in particular in terms of emissions. The work is divided into two parts. The first part discusses the theoretical aspects of combustion processes, desing types of gas burners and gas properties. The second part is devoted to calculating the combustion properties of natural gas, stoichiometry, the design and construction of three variants of the torch with respect to the required conditions. The final section focuses on an assessment of the proposed burner based on the experimental tests.

Keywords: natural gas, combustion systems, burners

Poděkování

Velmi rád bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli při tvorbě mé diplomové práce. V první řadě mé díky patří Ing. Stanislavu Honusovi, Ph. D. za průběžné vedení a odborné rady. Práce vznikla v rámci projektů Příležitost pro mladé výzkumníky CZ.1.07/2.3.00/30.0016 a Nové kreativní týmy v prioritách vědeckého bádání CZ.1.07/2.3.00/30.0055. Také bych rád poděkoval panu Tomáši Bláhovi ze společnosti NEXNET za konzultace při konstrukčním řešení. A v neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině za trpělivost a podporu v době mého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratek	9
1. Úvod.....	11
2. Zemní plyn – základní charakteristiky.....	12
2.1 Zásoby a těžba zemního plynu	14
2.2 Tok zemního plynu do Evropy	16
2.3 Zemní plyn v České Republice.....	17
2.4 Spotřeba zemního plynu v České republice	18
3. Průmyslové hořáky a jejich rozdělení.....	19
3.1 Hořáky na plyná paliva.....	19
3.1.1 Hořáky s úplným předmísením plynu a vzduchu.....	20
3.1.2 Hořáky bez předmísení plynu a vzduchu	21
3.1.3 Hořáky s částečným předmísením plynu a vzduchu	21
3.1.4 Hořáky s vícestupňovým přívodem okysličovadla/paliva	22
3.2 Rozdělení hořáku podle přívodu spalovacího vzduchu.....	22
3.2.1 Hořáky s přirozeným tahem	23
3.2.2 Hořáky s nuceným přívodem	23
4. Proces hoření plyných paliv.....	27
4.1 Chemická podstata hoření plyných paliv	28
4.1.1 Vliv teploty	29
4.1.2 Vliv koncentrace	30
4.1.3 Vliv tlaku.....	31
4.2 Vznik a tvorba plyných emisí při spalování zemního plynu	32
4.3 Statika spalování.....	33
4. Praktická část diplomové práce	34
4.1 Stanovení fyzikální a spalovacích vlastností zemního plynu	34
4.1.1 Hustota	34
4.1.2 Výhřevnost a spálené teplo zemního plynu	34

4.1.3	Meze zápalnosti zemního plynu.....	35
4.1.4	Zápalná teplota	36
4.1.5	Wobbeho číslo.....	37
4.2	Stechiometrické výpočty	38
4.3	Výpočty pro další varianty tranzitního zemního plynu	42
4.4	Návrh první konstrukční varianty hořáku.....	43
4.5	Návrh druhé konstrukční varianty	45
4.6	Návrh třetí konstrukční varianty.....	48
5.	Experimentální ověření.....	51
5.1	Návrh experimentu	51
5.2	Výsledky experimentu.....	55
6.	Závěr	59
	Seznam použité literatury.....	60
	Seznam příloh.....	62

Seznam použitých zkratk

Symbol	Význam
D	průměr
I_i	příspěvek entalpie i -té složky
K	koeficient tvorby
L	charakteristický lineární rozměr
Q_i	výhřevnost
Q_s	Spalné teplo
Q	teplo
\dot{Q}	tepelný výkon, tepelný tok
R	univerzální plynová konstanta
S	plocha
T	teplota
T_{TFT}	adiabatická teplota plamene
TS	skutečná teplota plamene
v	rychlost
V	objem
\dot{V}	objemový tok
V_m	molární objem
c_p	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
c_v	měrná tepelná kapacita za konstantního objemu
g	konstanta gravitačního zrychlení
h	výška
i	entalpie
l	délka
m	hmotnost
\dot{m}	hmotnostní tok
n	přebytek spalovacího vzduchu
p	tlak
Δp	tlaková difference
T	teplota
x	objemová koncentrace
y	hmotnostní koncentrace
η	dynamická viskozita
μ	průtokový koeficient
ν	kinematická viskozita
ρ	hustota
τ	čas
φ	relativní vlhkost
ω	rychlostní součinitel trysky

Dolní indexy	
<i>01</i>	začátek přísávacího otvoru
<i>02</i>	výstup přísávacího otvoru
<i>03</i>	parametry směsi spalín na vstupu do ejektoru
<i>04</i>	parametry hnacího vzduchu před tryskou ejektoru
<i>05</i>	parametry hnacího vzduchu na konci ejektorové trysky
<i>06</i>	parametry směsi ve směřovací komoře
<i>N, NP</i>	normální podmínky (101,325 kPa, 0°C)
<i>PO</i>	přísávací otvor
<i>PP</i>	provozní podmínky
<i>SP</i>	spaliny
<i>TSV</i>	teoretický suchý vzduch
<i>TV</i>	teoretický vlhký vzduch
<i>V</i>	skutečný vlhký vzduch
<i>X</i>	počet uhlíků v uhlovodíkové sloučenině
<i>Y</i>	počet vodíků v uhlovodíkové sloučenině
<i>ZP</i>	zemní plyn
<i>k</i>	kritický parametr trysky
<i>m</i>	molární
<i>max</i>	maximální hodnota
<i>min</i>	minimální hodnota

1. Úvod

V současné době je zemní plyn jeden z nejvýznamnějších energetických zdrojů ve světě, kde roční spotřeba zemního plynu ve světě je přibližně 2 mld. m³ ročně. Současné prokázané zásoby se odhadují na dalších 70 let. Podíl využití zemního plynu v České republice je okolo 17%. Při spalování zemního plynu vzniká ve srovnání s pevnými nebo kapalnými palivy daleko méně škodlivin. Oxid siřičitý (SO₂) je ve spalinách obsažený v zanedbatelném množství a také emise oxidu uhelnatého (CO) a uhlovodíků jsou ve srovnání s ostatními palivy výrazně nižší. Jediným vážnějším problémem při spalování zemního plynu je vznik oxidů dusíku (NO_x). Zemní plyn oproti ostatním palivům, neobsahuje žádné dusíkaté látky, takže oxidy dusíku vznikají pouze ze vzdušného dusíku.

Nároky na spalovací zařízení zemního plynu se neustále zvyšují jak z hlediska produkce emisí, tak i z hlediska efektivity provozu. Plynové hořáky, jimiž se tato práce zabývá, slouží k přeměně chemické energie paliva na energii tepelnou a to smícháním paliva s okysličovadlem. Nároky na optimální geometrie hořáků, závisí na skutečném charakteru proudění uvnitř spalovacího zařízení. Cílem této práce je navrhnout hořák pro spalování zemního plynu s ohledem na požadované parametry. Práce předkládá metodiku výpočtu a konstrukční návrh nízkotlakého plynového hořáku o výkonovém rozsahu 4 – 8 kW. Součástí práce je prezentace výsledků z testovacích měření navrženého hořáku, jež byly realizovány v Laboratoři tepelných procesů a proudění. Jsou zde mj. prezentovány výsledky týkající se obsahu škodlivých látek po výšce spalovacího prostoru při spalování zemního plynu v navrženém hořáku.

2. Zemní plyn – základní charakteristiky

Zemní plyn je jeden z nejvýznamnějších energetických zdrojů ve světě. Jedná se o přírodní hořlavou směs plynů. Dominantní složkou zemního plynu je metan, který představuje asi 90 % této směsi, zbytek tvoří další složky např. (etan, propan, butan, dusík). Jednotlivé poměry složek zemního plynu se odvíjí od původu zemního plynu. Zemní plyn je bezbarvý a nezapáchá. Není jedovatý a má menší hmotnost než vzduch. Ložiska zemního plynu se v přírodě vyskytují buď samostatně, častěji však současně s ropou nebo černým uhlím. Vznik zemního plynu byl způsoben organickým rozkladem živočišných a rostlinných zbytků a vznikal podobně jako ropa nebo černé uhlí. Teorie na původ zemního plynu se různí ale teorie organického rozkladu je obecně nejrozšířenější. [1]

Zemní plyn můžeme rozdělit do 4 kategorií:

- Zemní plyn chudý
- Zemní plyn bohatý
- Zemní plyn kyselý
- Zemní plyn s vysokým obsahem nehořlavých složek

Zemní plyn chudý

Jsou plyny s dominantním obsahem metanu až 99 % a nepatrným obsahem vyšších uhlovodíků a nehořlavých plynů.

Zemní plyn bohatý

Na rozdíl od zemního plynu chudého, se liší vyšším podílem vyšších uhlovodíků na úkor metanu. Vyšší uhlovodíky jsou převážně nasycené uhlovodíky jako propan, butan a etan.

Zemní plyn kyselý

Zemní plyn kyselý, kromě obligátního metanu obsahuje velké množství sulfanu. Sulfan je ale nežádoucí složkou, proto se před distribucí ze zemního plynu odstraňuje.

Zemní plyn s větším obsahem nehořlavých prvků

Poslední kategorii tvoří zemní plyn s vyšším obsahem nehořlavých plynů, tedy především oxidu uhličitého a dusíku.

2.1 Druhy zemního plynu

Jednotlivé druhy zemního plynu se mezi sebou liší převážně v poměru obsahu metanu a podílem vyšších uhlovodíků. Jednotlivé složení zemních plynů je zobrazeno v Tab. 1. [22]

Tranzitní zemní plyn (Rusko)

Tranzitní zemní plyn je těžen v západosibiřské oblasti Ruska, kde nejznámější naleziště jsou Urengojské a Jumburské oblasti. Do Česka proudí plynovody přes Polsko a Slovensko. Složení tranzitního zemního plynu je řazeno do kategorie H.

Norský zemní plyn

Norský zemní plyn je těžen v oblasti Severního moře a proudí soustavou podmořských plynovodů, které vedou na území Německa. Na rozdíl od tranzitního zemního plynu má větší podíl vyšších uhlovodíků a tím i vyšší spalné teplo. Patří do kategorie H a největším odběratelem plynu je Německo.

Alžírský zemní plyn

Alžírsko je největší producent zemního plynu na africkém kontinentu. Do Evropy zemní plyn proudí systémem plynovodů do Španělska a Itálie nebo je zemní plyn zkapalněn a dopravován námořní dopravou. Alžírský zemní plyn patří do kategorie H.

Nizozemský zemní plyn

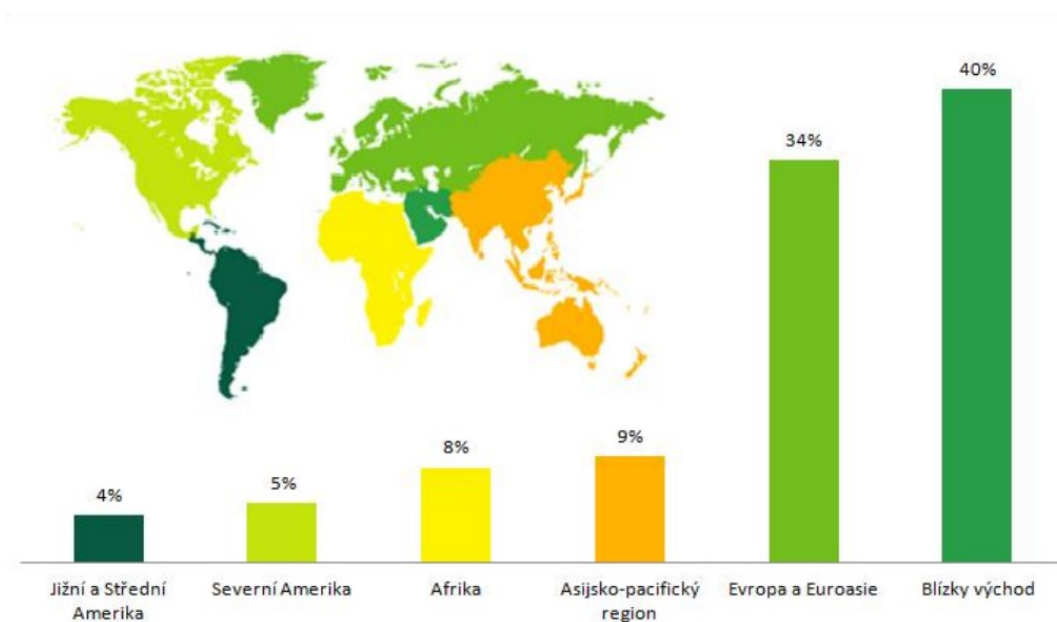
Plyn je těžen z ložiska Groningen a patří do kategorie L, tedy mezi plyny s nižším spalným teplem. Nizozemí patří mezi nejvýznamnější západoevropské dodavatele zemního plynu.

Složky zemního plynu	Chemická značka	Objemový podíl složky v zemním plynu [%]				
		Tranzitní	Norský	Alžírský	Holandský	Americký
Metan	CH ₄	98,39	85,8	86,9	81,31	99,72
Etan	C ₂ H ₆	0,44	8,49	9	2,85	0,06
Propan	C ₃ H ₈	0,16	2,3	2,6	0,37	0,0005
Butan	C ₄ H ₁₀	0,07	0,7	1,2	0,14	0,0005
Pentan	C ₅ H ₁₂	0,03	0,25	0	0,09	0
Dusík	N ₂	0,84	0,96	0,3	14,35	0,2
Oxid uhličitý	CO ₂	0,07	1,5	0	0,89	0,019

Tab. 1 Složení vybraných zemních plynů

2.1 Zásoby a těžba zemního plynu

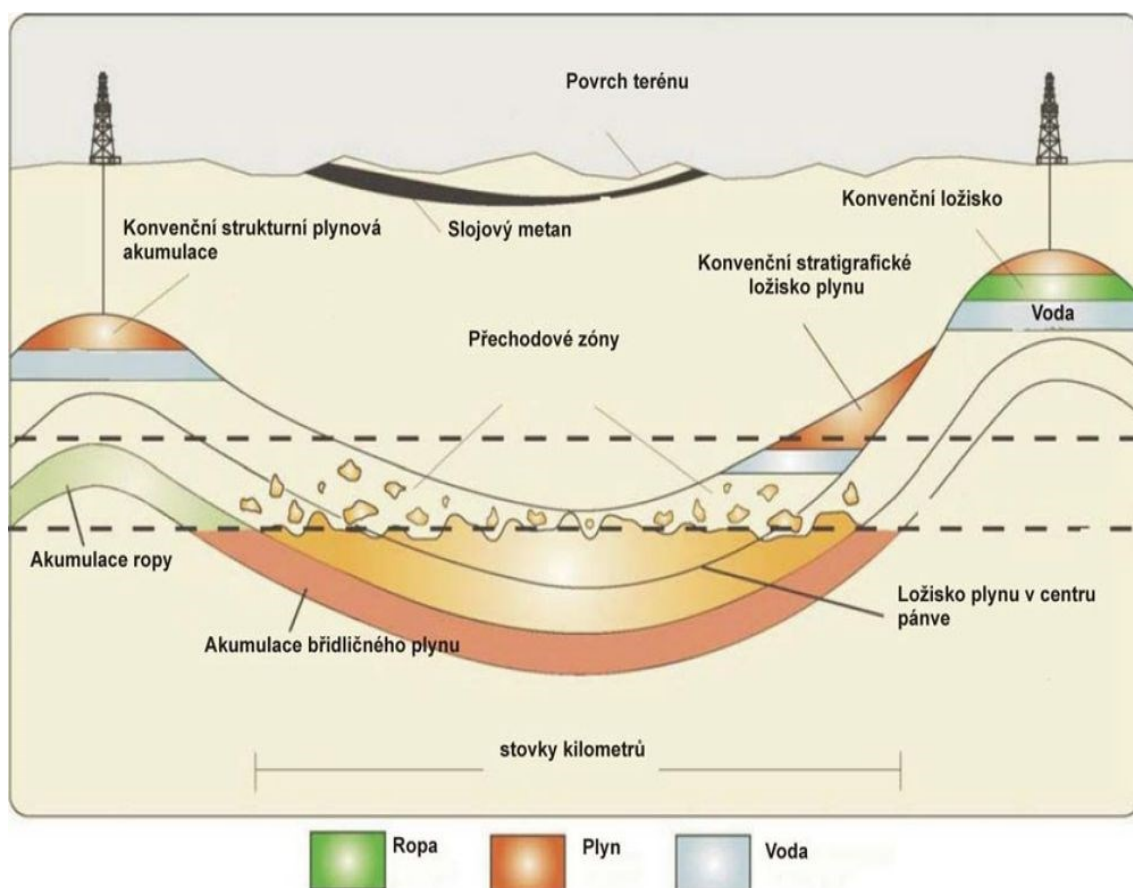
Roční spotřeba zemního plynu ve světě je kolem 2 200 mld. m³ ročně. Zemní plyn mezi tuhými a kapalnými palivy patří mezi tři nejvýznamnější energetické zdroje. Prokázané zásoby na celém světě zemního plynu jsou dnes 161 000 mld. m³. Při současném tempu těžby vydrží minimálně 70 let. Celkové zásoby zemního plynu se odhadují na 495 000 mld. m³ a mezi největší území se zásobami zemního plynu patří Rusko a země Středního Východu. Pro zásobování evropského kontinentu jsou kromě dodávek z Ruska důležité i dodávky ze Severního moře. Zde se nachází přibližně 80 % evropských zásob zemního plynu. Z těchto ložisek v současné době se těží přibližně 200 mld. m³ zemního plynu ročně. Na Obr 1.1 vidíme ověřené zásoby zemního plynu.



Obr. 1 Ověřené zásoby zemního plynu [14]

Při těžbě zemního plynu musíme rozlišit zemní plyn naftový, který je zpravidla uložen v pórovitých horninách, které jsou ohraničeny nepropustnými vrstvami a vodou, kde se nahromadil v průběhu tisíců let nad vrstvami ropy nebo vody protože zemní plyn je lehčí než vzduch. Těžba zemního plynu probíhá vrty vedenými přímo do pórovitých ložisek, které se většinou nacházejí do 3 km pod povrchem země. Plyn můžeme těžit i z mnohem větších hloubek až do 8 km. Zemní plyn můžeme těžit jak z ložisek na pevnině tak z ložisek, které se nacházejí pod mořským dnem.

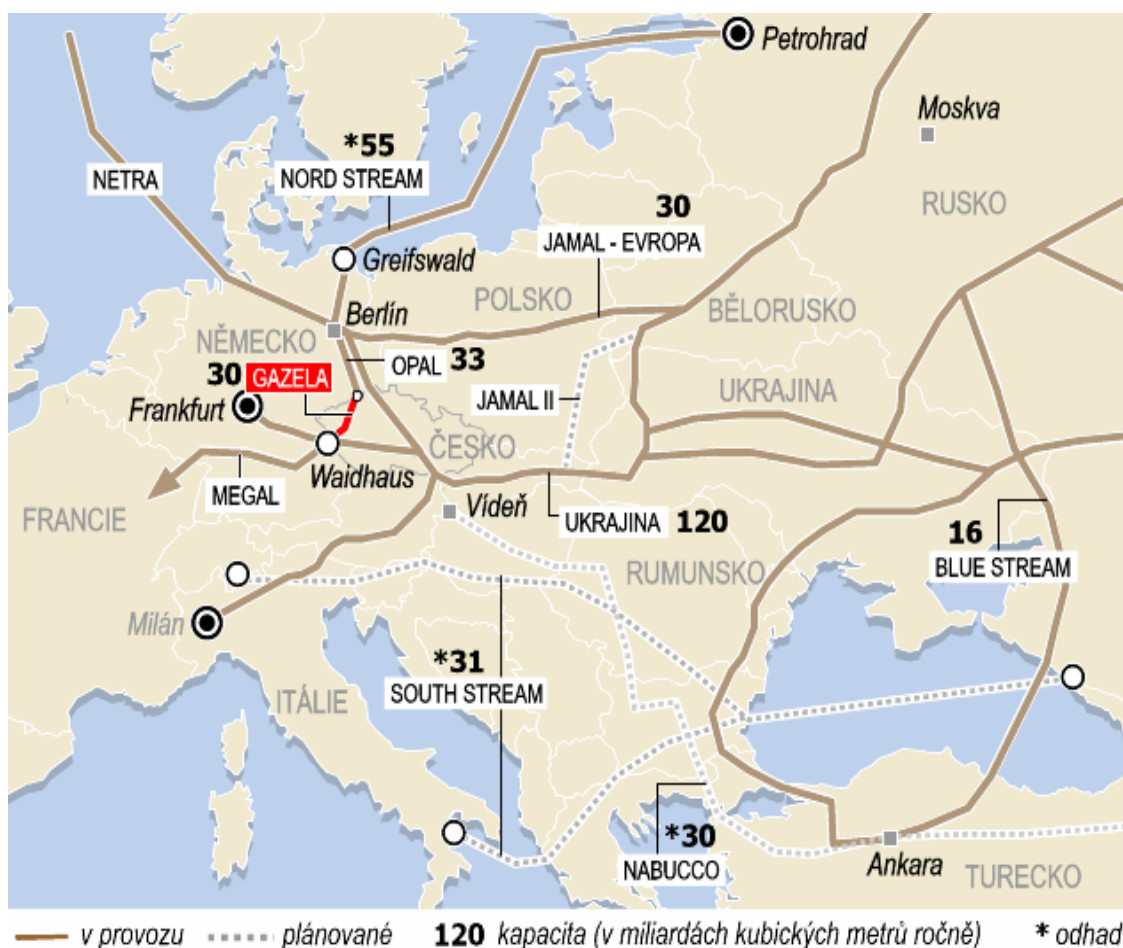
Naopak zemní plyn karbonový vzniká přeměnou prvohorních rostlin na černé uhlí a vyskytuje se v ložiscích černého uhlí. Při těžbě uhlí dochází k jeho uvolnění a je proto z bezpečnostních důvodů odsáván jako degazační plyn. Těží se i přímo z uhelných slojí. Ve vybraných lokalitách je možné karbonový plyn dlouhodobě těžit. Před vlastní těžbou se musí vlastnosti ložiska uhlí prozkoumat a pro zlepšení výtěžnosti zvýšit plynopropustnost uhelných slojí. Vytěžený plyn se před dálkovou přepravou musí upravit na takovou kvalitu, aby se bez dalších úprav mohl okamžitě používat. Tato technologie je závislá na složení zemního plynu. Při těžbě zemního plynu společně s ropou dochází k většímu obsahu vyšších uhlovodíků. Látky jako voda nebo sirné látky mohou negativně působit na distribuční síť a můžou způsobovat korozi. Dále může vysoký podíl vlhkosti způsobit ucpání plynovodů, protože voda s metanem za určitého tlaku a teploty vytváří pevné hydráty. Zemní plyn může obsahovat prachové částice, které mohou poškodit kompresorové nebo regulační stanice, proto se každý plyn suší a zbavuje pevných látek, případně se odstraňují vyšší uhlovodíky a jiné látky, zda jsou přítomny. [2]



Obr. 2 Diagram znázorňující konvenční a nekonvenční způsob těžby [15]

2.2 Tok zemního plynu do Evropy

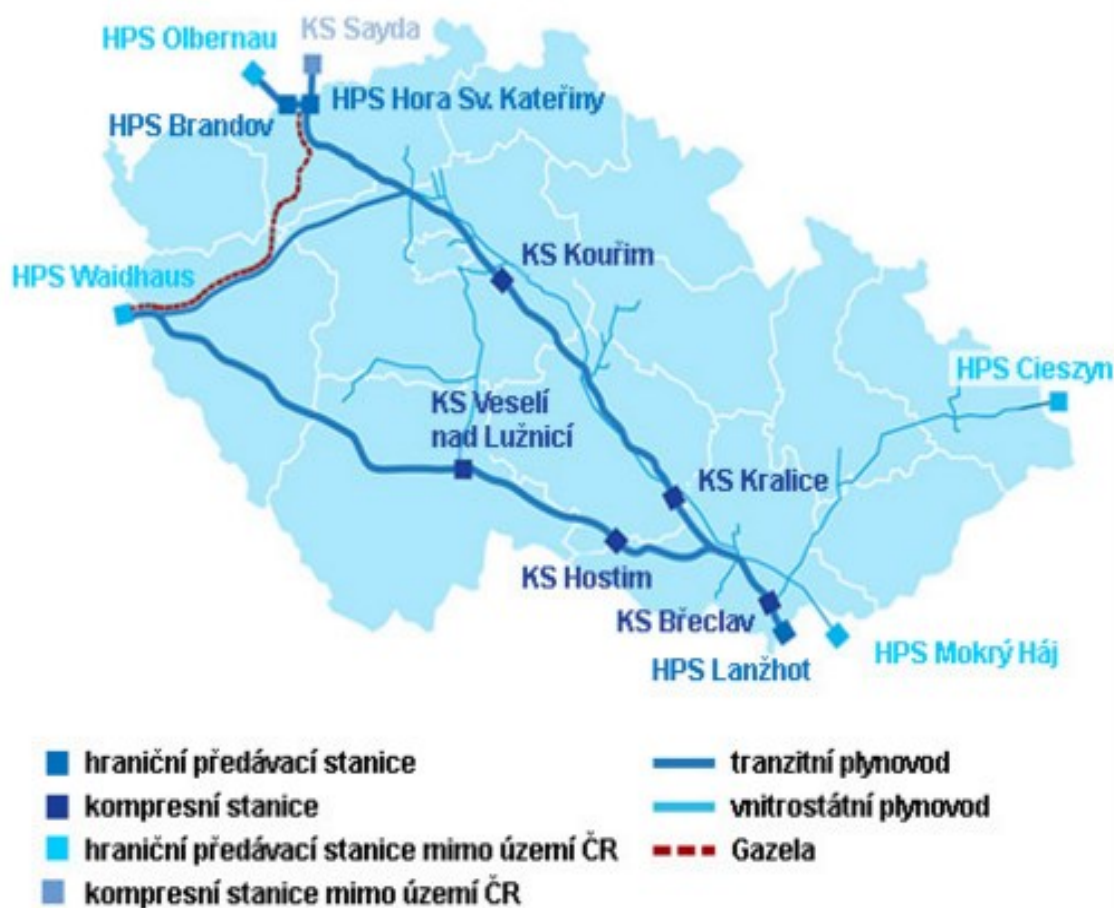
Dodávky zemního plynu do Evropy jde zajistit různými způsoby. Většina států Evropy nemá zásoby zemního plynu, proto musí spoléhat na vnější dodávky. Doprava zemního plynu je zajišťována sítí plynovodů. Plynovody mohou být vedeny jak pod zemí nebo po mořském dně. Dokonalou dodávku zemního plynu zajišťuje systém vysokotlakého potrubí, kompresorové stanice a další technické zařízení. Většina zemního plynu je dopravována z Ruska okolo 80 % a je dopravován pomocí plynovodu Bratrství. Plynovod vede z Ruska přes Ukrajinu a Českou republiku a následně byl prodloužen do Německa a Rakouska. Kapacita plynovodu je 120 mld. m³ zemního plynu ročně. Dalším plynovodem, který prochází Českou republikou je plynovod Netra, který přivádí plyn z Norska. Na Obr. 1.3 vidíme trasy plynovodů pro Evropu. [2]



Obr. 3 Trasy plynovodů do Evropy [2]

2.3 Zemní plyn v České Republice

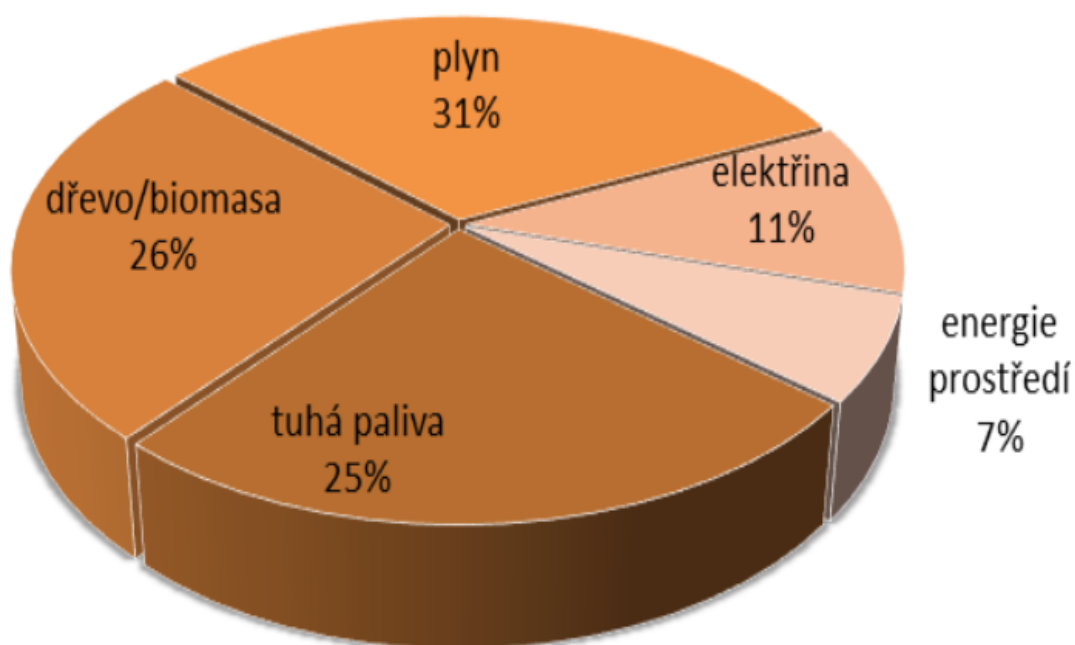
V České republice jsou zásoby zemního plynu velice malé. Největší lokalitou těžby je Jižní Morava. Těžba se pohybuje pod 100 mil. m³ plynu ročně a podílí se na celkové spotřebě v ČR necelým jedním procentem. Plyn je dopravován tranzitními plynovody z Ruska a Norska. Dodávka plynu z Ruska přichází na naše území ze Slovenska do předávací stanice v Lanžhotě. Naproti tomu dodávky z norského zemního plynu vstupují přes předávací stanici Hora Sv. Kateřiny. V předávací stanici dochází k úpravě tlaku plynu na hodnotu v dané vnitrostátní síti. Složení obou zemních plynů se prakticky neliší. Roční spotřeba zemního plynu v ČR se pohybuje kolem 10 miliard m³ z toho 7,8 mld. m³ je dopravováno z Ruska a 1,8 mld. m³ z Norska. Na Obr 1.4 vidíme trasy plynovodů do České republiky. [3]



Obr. 4 Trasy plynovodů procházející Českou republikou [16]

2.4 Spotřeba zemního plynu v České republice

Díky masivní podpoře plynofikace v první polovině minulého desetiletí se zvýšila spotřeba zemního plynu z cca 6 mld. m³ na 9,5 mld. m³. Na této úrovni se spotřeba zemního plynu pohybuje posledních 5 let. Svým odběrem se tak Česká republika podílí na celosvětové spotřebě zemního plynu necelou polovinou procenta. Zemní plyn v ČR nezaujímá v bilanci energetických zdrojů tak významnou pozici jako v zemích EU. Česká energetika je postavena na využívání vlastních zdrojů uhlí, které se na spotřebě podílí přibližně z 50 %. Na Obr. 5 můžeme vidět podíl primárních obnovitelných zdrojů v ČR. [2]



Obr. 5 Procentuální podíl prodeje zdrojů do 50 kW podle druhu paliva v České republice [17]

3. Průmyslové hořáky a jejich rozdělení

Hořák definuje jako zařízení, které přeměňuje chemickou energii paliva na energii tepelnou a to smícháním paliva s okysličovadlem, který je ve většině případů atmosférický vzduch. Hořák je základní součást spalovacího procesu.

Hořák musí splňovat tyto konstrukční požadavky:

- Zajištění kvalitního promísení reakčních složek – paliva a okysličovadla
- Zajistit trvalý a stabilní zdroj hoření
- Udržení plamene v požadované oblasti a tvořit žádaný tvar plamene.

Průmyslové hořáky jsou zařízení skládající se z mnoha součástí, kde každá má svůj význam pro správné plnění své funkce. [4]

3.1 Hořáky na plynná paliva

Hořáky spalující plynná paliva patří mezi nejpoužívanější a je to dáno vlivem jednodušší konstrukce, nižší pořizovací ceny a dostupnosti paliva. Spalování plyných paliv nevyžaduje z hlediska konstrukce žádnou speciální úpravu paliva na rozdíl od kapalných paliv (atomizace) nebo tuhých paliv (drcení paliva na prášek). Palivo je jednoduše přiváděno do ohniště pod požadovaným tlakem. Z hlediska tvorby emisí vycházejí plynná paliva jako šetrnější k životnímu prostředí, neboť neobsahují velké množství síry a dusíku, které se podílejí na vzniku NO_x a SO_x . Z ekologického hlediska vycházejí plynové hořáky jako nejšetrnější k životnímu prostředí, neboť plynná paliva neobsahují velké množství škodlivých látek. [5]



Obr. 6 Model hořáku na plynná paliva

Základní rozdělení hořáků

Hořáky dělíme podle mnoha rozličných faktorů, kde základní rozdělení je uvedeno zde:

- podle způsobu tvorby spalovací směsi
- podle typu spalovaného paliva
- podle způsobu přivádění okysličovadla

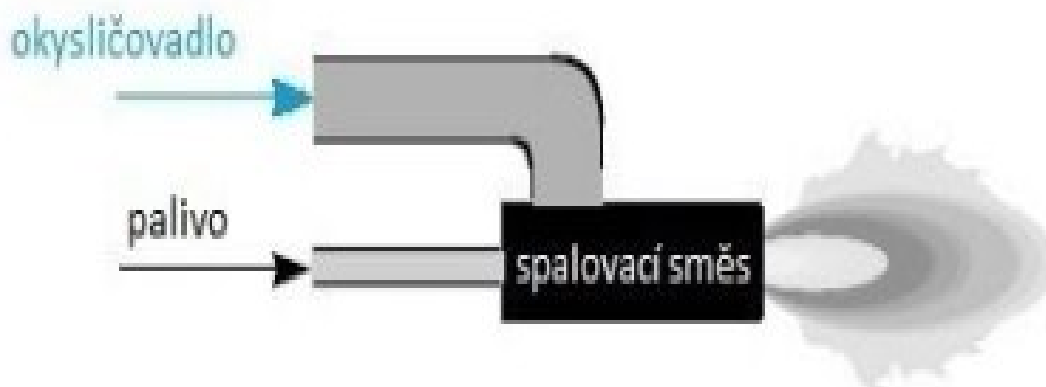
Hořáky podle způsobu tvorby směsi

Podle tohoto kritéria je směřování zemního plynu se vzduchem rozděleno na jednotlivá kritéria:

- Hořáky s úplným předmísením plynu a vzduchu
- Hořáky bez předmísení plynu a spalovacího vzduchu před vstupem do spalovacího prostoru
- Hořáky s částečným předmísením plynu a vzduchu

3.1.1 Hořáky s úplným předmísením plynu a vzduchu

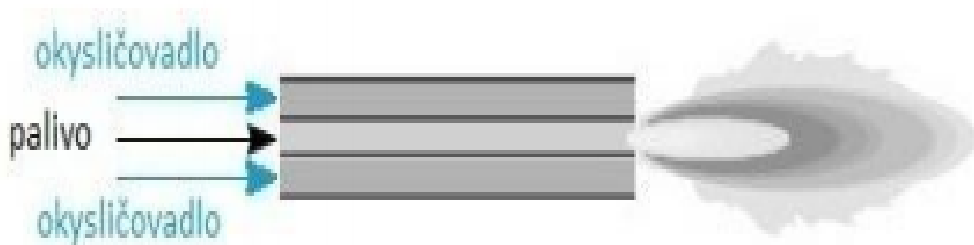
Palivo přiváděné do hořáku, je kompletně předmíseno s okysličovadlem a vytváří spalovanou směs ještě před vstupem do oblasti spalování. Rychlost vytváření spalovací směsi musí být vyšší než rychlost spalování, jinak by hrozilo vzplanutí spalovací směsi v ústí hořáku a mohlo by jej tak poškodit vysokými teplotami. Charakteristickým rysem hořáků s předmísenou směsí je kratší a intenzivnější plamen. Tímto způsobem dosahujeme vyšších teplot a umožňuje lepší přenos tepla zejména radiačním způsobem, který roste se čtvrtou mocninou teploty. Tento typ hořáků je zejména využíván u hořáků s menšími parametry výkonu. [7]



Obr. 7 Model hořáku s nuceným přívodem vzduchu [8]

3.1.2 Hořáky bez předmísení plynu a vzduchu

Tento typ hořáků se označujeme jako difuzní, kde je palivo a okysličovadlo uvnitř hořáků od sebe odděleno a ke vzniku spalovací směsi dochází až v oblasti za hořákem. Poměr rychlosti přiváděného plynu a počtu trysek hořáku nám určuje intenzitu směřování, která určuje charakter plamene. Na rozdíl od hořáků s předmísenou směsí je délka plamene větší. Tento druh hořáků s odděleným přívodem spalovacího vzduchu a přívodem paliva přímo do topeniště využíváme například pro hořáky pracující na principu palivo-kyslík, kde se musí zabránit vysoké reaktivitě kyslíku a vrácení plamene do těla hořáku, tzv. prošlenutí. Delší plamen charakteristický pro tento typ hořáků, zajišťuje rovnoměrnější rozložení teploty ve spalovacím prostoru spolu se snížením teplotních špiček plamene, což má příznivý vliv na tvorbu oxidů dusíku. [7]



Obr. 8 Model hořáku s nuceným přívodem vzduchu [8]

3.1.3 Hořáky s částečným předmísením plynu a vzduchu

Jedná se o kompromis spojující vlastnosti obou předchozích typů hořáků. U hořáků s částečným předmísením je část paliva smíchána před vstupem do ohniště a spalovací směs vycházející z hořáku je podporována dalším přívodem vzduchu. Částečně předmísená směs pomáhá stabilnímu hoření plamene u ústí hořáku, sekundární přívod vzduchu naopak napomáhá proti prošlenutí plamene do těla hořáku. [7]



Obr. 9 Model hořáku s nuceným přívodem vzduchu [8]

3.1.4 Hořáky s vícestupňovým přívodem oksyličovadla/paliva

Jedná se o způsob postupného vytváření spalovací směsi za pomoci speciální konstrukce hořáku. V případě vícestupňového přívodu oksyličovadla je část oksyličovadla smíchána s palivem, což znamená, že v prvním stupni nedochází k úplnému spalování paliva a zbytek oksyličovadla je později přiváděn do oblasti plamene sekundárními nebo terciárními tryskami. U hořáků s vícestupňovým přívodem paliva je princip obdobný s rozdílem, že se ve stupních dávkuje palivo. Tyto metody tvorby směsi se využívají často k potlačení tvorby oxidů dusíku, protože podporují snížení teploty v jádru plamene.

Rozdělení hořáku podle tlaku zemního plynu

Plynové hořáky rozdělujeme:

- Nízkotlaké hořáky s přetlakem zemního plynu do 5kPa
- Středotlaké hořáky s přetlakem zemního plynu 5 až 400 kPa

3.2 Rozdělení hořáku podle přívodu spalovacího vzduchu

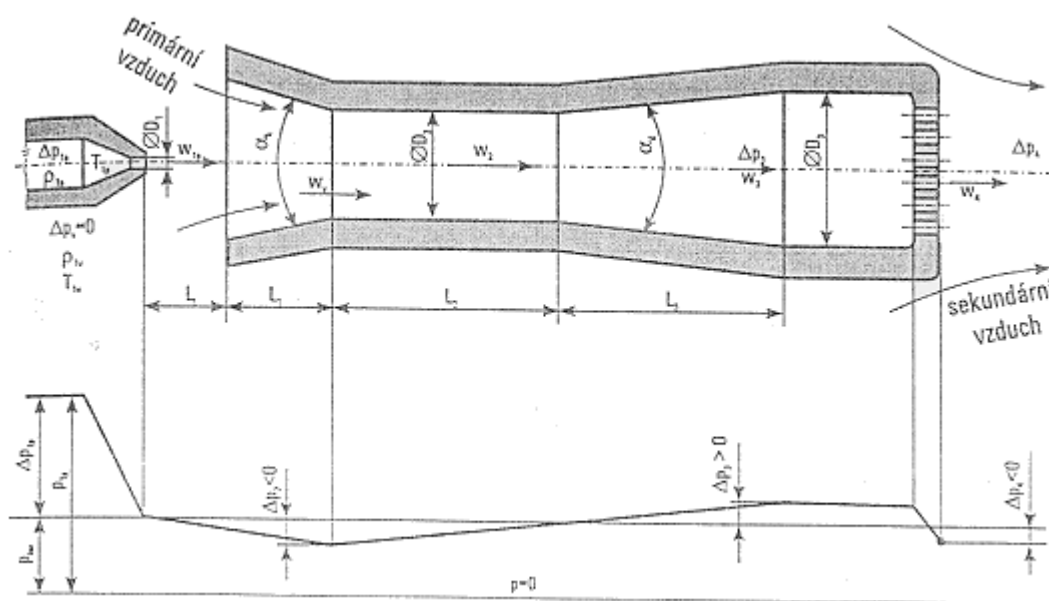
U většiny hořáku se jako oksyličovadlo používá atmosférický vzduch nasávaný z okolní atmosféry (cca 21% O₂), dále vzduch obohacený kyslíkem (podíl O₂ > 21%) a v procesech požadujících dosažení vysokých teplot se užívá čistého kyslíku. Do hořáku se paliv přivádí buď tahem paliva tzv. ejekčním účinkem, nebo nuceným způsobem za pomoci ventilátorů.

Podle toho rozdělujeme na hořáky:

- Hořáky s přirozeným tahem
- Hořáky s nuceným přívodem spalovacího vzduchu

3.2.1 Hořáky s přirozeným tahem

Nasávání spalovacího vzduchu je způsobeno ejekčním účinkem spalovaného paliva, ten je způsoben proudícím palivem, které kolem sebe vytváří podtlak vlivem své rychlosti a tento jev vychází z Bernoulliho rovnice. Jestliže je palivo přiváděné pod nízkým tlakem ejekční účinek spalovaného paliva stačí nasát jenom část potřebného vzduchu pro spalování a zbytek vzduchu je dodán tahem spotřebiče regulovaného škrcením komínové klapky. Tento způsob se využívá zřídka a u malých aplikací a tam kde je výhodnější kvůli své nižší pořizovací ceně. Nevýhoda tohoto hořáku je snížená schopnost regulace výkonu, proto se uplatňuje v případech, kdy není potřeba širokého rozsahu hořáku. [12]



Obr. 10 Hořák s přirozeným tahem vzduchu [18]

3.2.2 Hořáky s nuceným přívodem

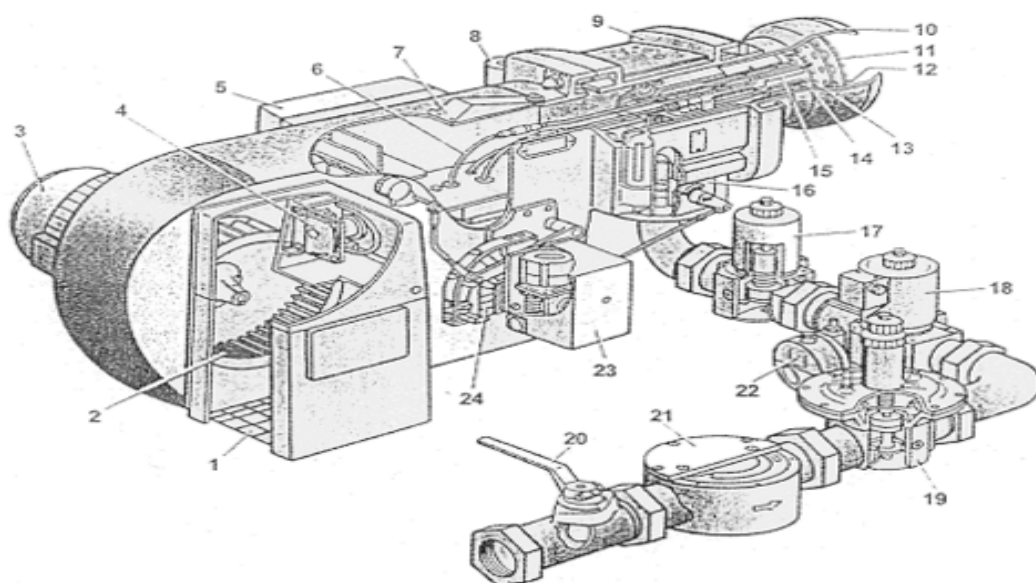
Tento druh hořáků s nuceným přívodem vzduchu tvoří dominantní část v průmyslových aplikacích. Vzduch je do hořáku dopravován ventilátorem. Regulace množství a přetlaku přiváděného vzduchu, lze měnit změnou otáček ventilátoru nebo škrcením vzduchové klapky. Regulace vzduchu umožňuje hořákům široký rozsah pracovního záběru. To je oproti hořákům s přirozeným tahem výhoda a umožňuje širší rozsah pracovního záběru.

Hořáky rozdělujeme podle umístění ventilátoru:

- Blokové (ventilátor je součástí hořáku)
- Výkonové (spalovací vzduch je přiváděn pomocí vzduchových kanálů)

Zdroj spalovacího vzduchu je obvykle radiální ventilátor. Spalovací vzduch je přiváděn buď studený nebo předeřhřátý v rekuperátoru nebo v regenerátoru. Do skupiny hořáku s nuceným přívodem vzduchu patří i regenerační a rekuperační hořáky, které mají výměník pro ohřev spalovacího vzduchu teplem spalin. Podle způsobu směsování zemního plynu a vzduchu, podle tvaru plamene se hořáky rozdělují na tyto základní typy:

- polovířivé hořáky se středně dlouhým plamenem
- vířivé hořáky s krátkým plamenem
- impulzní hořáky s vysokou rychlostí spalin
- sálavé hořáky
- sálavé trubky se spalováním v uzavřeném prostoru



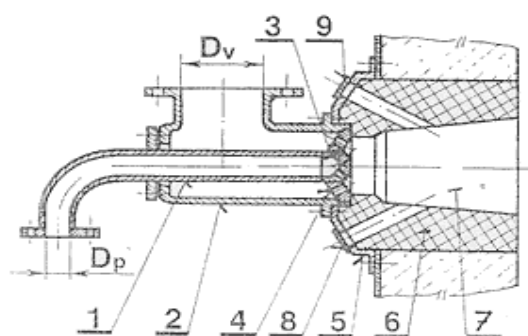
Obr. 11 Hořák s nuceným přívodem vzduchu [18]

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1 - přívod vzduchu | 13 - plynová tryska |
| 2 - ventilátor | 14 - směšovač |
| 3 - el. Motor | 15 - zapalovací elektroda |
| 4 - vzduchový termostat | 16 - plynová regulační klapka |
| 5 - skříň automatiky hořáku | 17 - plynový magnetický ventil |
| 6 - kabel zapalovací elektrody | 18 - plynový magnetický ventil |
| 7 - pozorovací otvor | 19 - regulátor tlaku plynu |
| 8 - příruba hlídače plamene | 20 - uzávěr plynu |
| 9 - příruba hořáku | 21 - plynový filtr |
| 10 - ústí hořáku | 22 - plynový termostat |
| 11 - stabilizátor plamene | 23 - pohon regulačních klapek |
| 12 - hlídací elektroda | 24 - ústrojí pro seřizování spalovacího poměru |

V bloku hořáku na Obr. 10 je uloženo oběžné kolo radiálního ventilátoru, které vytváří přetlak vzduchu potřebný pro mísení paliva se vzduchem. U přetlakových hořáků dodává ventilátor energii pro překonání odporu ve spalovacím prostoru. Blokové hořáky se většinou používají pro menší nebo střední výkony je to dáno zejména nižšími přípustnými provozními teplotami, které jsou limitovány konstrukčním uspořádáním ústí hořáku a materiály. Blokové hořáky patří mezi hořáky bez předmísení plynu se vzduchem. Směsování probíhá až v ústí hořáku při současném spalování vytvořené směsi. Blokové hořáky patří mezi hořáky s volným plamenem.[12]

Vířivé hořáky

Největší uplatnění vířivých hořáku se nachází pro použití otopu pecí, kde nejsou kladeny velké nároky na rovnoměrnost ohřevu. Mísení paliva se vzduchem dochází na krátké vzdálenosti při přebytku spalovacího vzduchu $n = 1,1$ až $1,15$.



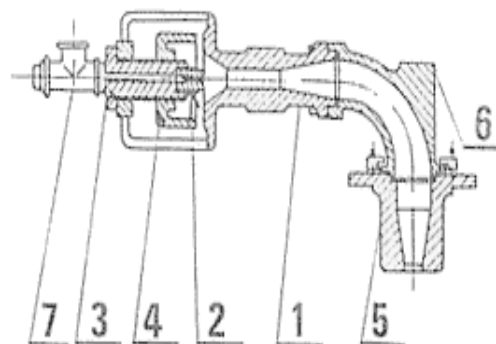
Obr. 12 Řez vířivým hořákem [18]

- 1 - plynové těleso hořáku
- 2 - vzduchové těleso hořáku
- 3 - plynová tryska
- 4 - vzduchová tryska
- 5 - hořáková deska

- 6 - hořáková tvarovka
- 7 - spalovací kanál
- 8 - zapalovací otvor
- 9 - pozorovací otvor

Injektorové hořáky

Největší uplatnění injektorových hořáků nacházíme v průmyslovém ohřevu, zvláště pro otop průmyslových pecí. Hlavní nedostatek injektorových hořáků je že neumožňují spalování zemního plynu s předeřtým spalovacím vzduchem.



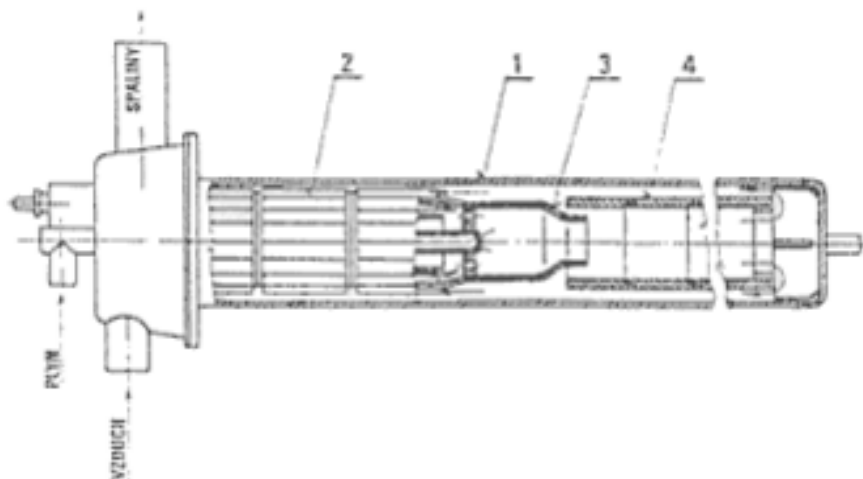
Obr. 13 Řez injektorovým hořákem [18]

- 1 - difuzor
- 2 - plynová tryska
- 3 - těleso trysky
- 4 - vzduchový regulační kotouč
- 5 - ústí hořáku

- 6 - koleno
- 7 - plynová odbočka

Impulzní hořáky

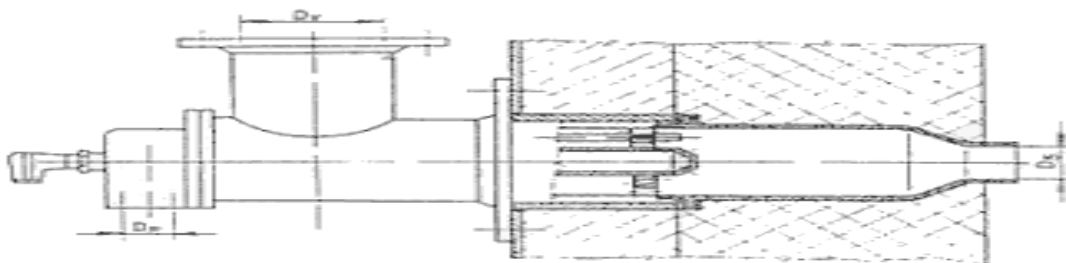
Impulzní hořáky pracují s vysokými rychlostmi spalin z ústí spalovacího kanálu (80 až $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), jejich dynamickým účinkem vzniká v pracovním prostoru teplotně a tlakově homogenní prostředí.



Obr. 14 Řez impulzním hořákem [18]

Sálavé trubky

Sálavé trubky jsou plynové hořáky se spalováním plynovzdušné směsi v uzavřeném prostoru a používají se pro nepřímý ohřev, kdy styk vsázky se spalinami je z technologických důvodů nežádoucí. Teplo, vyvinuté spalováním plynovzdušné směsi, se přenáší na stěnu trubky a z jejího povrchu se teplo přenáší sáláním na povrch vsázky. Spaliny jsou po využití v rekuperátoru odváděny do komína.



Obr. 15 Řez sálavou trubkou [18]

1- plášť sálavé trubky
2 – rekuperátor

3 - tvarovka hořáku Si
4 - spalovací trubice

4. Proces hoření plynných paliv

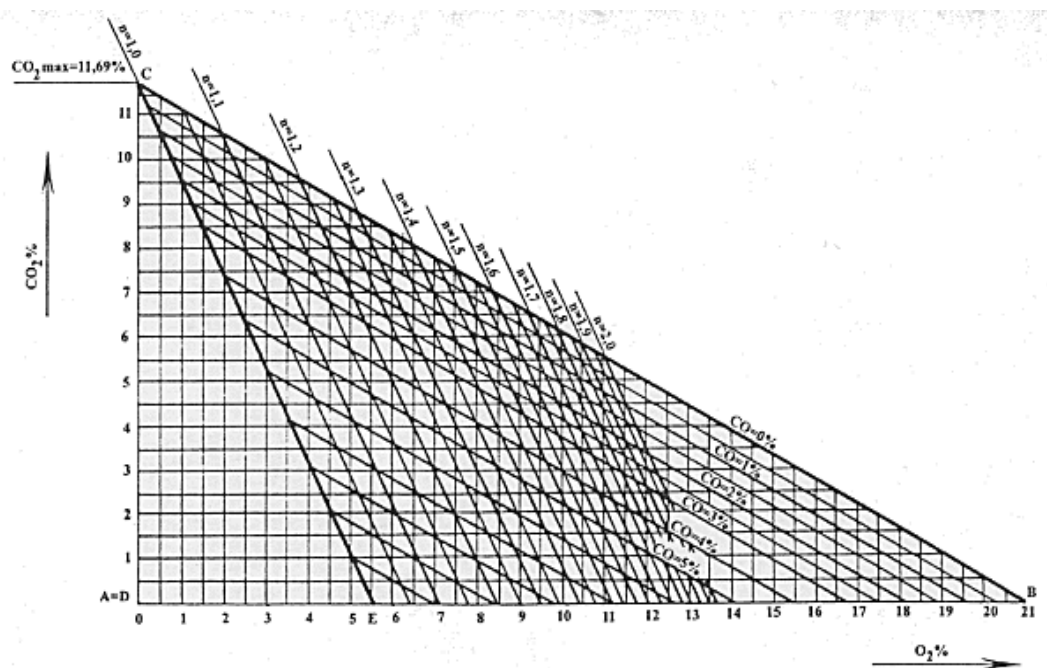
Hoření je pojem zaměřující se na průběh reakcí hoření, a to nejen ve svém celkovém pohledu vstupních konečných reakcí s příslušným tepelným efektem, ale také v detailním pohledu dílčích reakcí, které ve svém komplexu vytvářejí jednoduchou reakci spalování paliv. Hoření je zaměřeno na zákonitosti tvorby a vzniku hořlavé směsi (turbulentní a laminární difuze, molární a molekulová difuze, meze zápalnosti, ohřev hořlavé směsi, stabilita hoření, normálová rychlost hoření), tak na termodynamických veličinách: teplotě, koncentraci, tlaku a aktivační energii. Obecně je známé, při spalování ušlechtilých paliv s vysokou výhřevností, vzniká po vznícení takové množství tepelné energie, že je vlastní průběh reakcí bezproblémový, díky vysoké teplotě a vysoké rychlosti reakce a tudíž zajišťuje dokonalé spálení paliva. S klesající výhřevností paliva začíná být mechanismus hoření paliva složitější, čím větší pozornost je potřeba věnovat problematice hoření. Neboť klesající rychlost hoření způsobí problematické nedokonalé spalování, které vede k energetickým ztrátám a nižší účinnosti. [6]

Dokonalé hoření

Při dokonalém spalování nevznikají zplodiny schopné dalšího hoření, zpravidla jen CO_2 a vodní páry. Pojem dokonalé hoření je z důvodu dokonalosti proběhnuté chemické reakce. [9]

Nedokonalé hoření

Při nedokonalém hoření vznikají zplodiny schopné dalšího hoření. Nedokonalé spalování posuzujeme podle stupně vyhoření uhlíku. Část uhlíku shoří nedokonale na CO , další část neshoří vůbec a část uhlíku shoří na CO_2 . Nedokonalé spalování zobrazujeme do Ostwaldova trojúhelníku. Ten slouží ke kontrole dokonalosti spalování a stanovení parametrů spalování. Na Obr. 16 můžeme vidět Ostwaldův trojúhelník pro tranzitní zemní plyn. Stav dokonalého spalování leží na přeponě trojúhelníku. Mezi osami X a Y dochází k nedokonalému spalování, kde lze odečíst množství CO a α . [9]



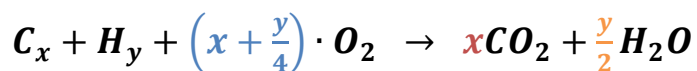
Obr. 16 Ostwaldův trojúhelník pro tranzitní zemní plyn [19]

4.1 Chemická podstata hoření plynných paliv

Chemická kinetika hoření sleduje děje a rychlosti oxidačních reakcí paliva v závislosti na podmínkách hoření. K nejvýraznějšímu ovlivnění dochází u termodynamických veličin teploty, koncentrace a tlaku.

Chemické reakce jednotlivých prvků hoření

Jedná se o proces, kdy za vhodných podmínek dochází ke změně struktury chemických látek. Látka vstupující do reakce je reaktant, látky vystupující je produkt. Při tomto procesu dochází ke změnám chemických vazeb. Obecný předpis pro reakci uhlovodíků a kyslíku popisuje následující vztah:

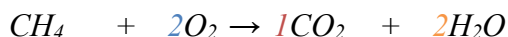


$\left(x + \frac{y}{4}\right)$ = v rovnici značí koeficient tvorby kyslíku

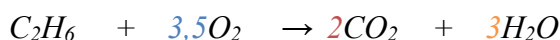
x = představuje koeficient tvorby oxidu uhličitého

$\frac{y}{2}$ = koeficient tvorby vody

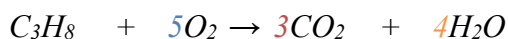
Metan



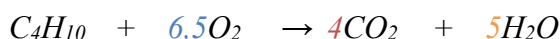
Ethan



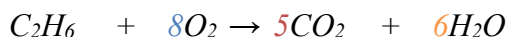
Propan



Butan



Pentan



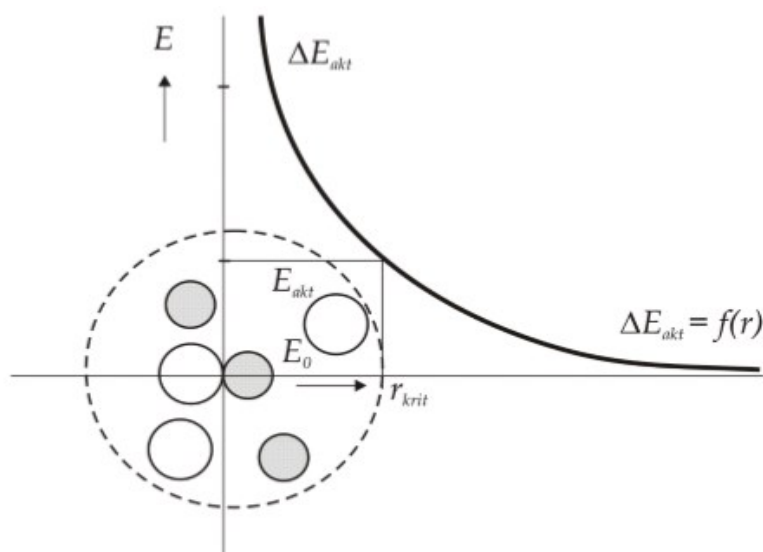
Pro vysvětlení koeficienty uvádí poměry mezi jednotlivými sloučeninami. Například rovnice metanu udává, že pro dokonalé spálení 1 mN^3 metanu je zapotřebí 2 mN^3 kyslíku za vzniku 1 mN^3 oxidu uhličitého a 2 mN^3 vodní páry. [5]

4.1.1 Vliv teploty

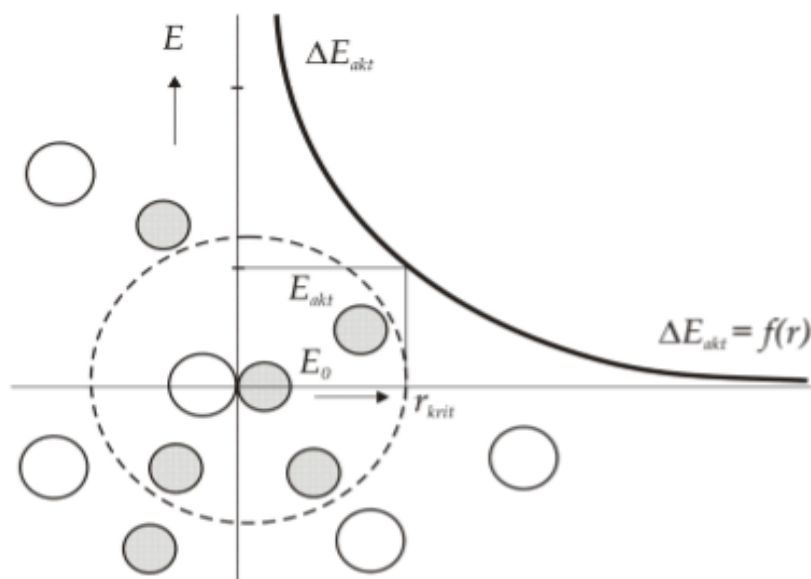
Teplota jako termodynamická veličina má na rychlost reakce největší vliv. V rámci možností prostředků, kterými řídíme ovlivňováním termodynamických podmínek průběh spalovacích reakcí. Teplota jako potenciál energie běžně měřená různými typy přístrojů nebo teploměrů, vyjadřuje ve svém principu rychlost pohybu molekul nebo atomů. U plynné fáze se jednotlivé molekuly pohybují určitou rychlostí a za určitých podmínek dojde k jejich srážce v prostoru. Ale v systému kde máme dva druhy molekul (kyslík a palivo), dojde při jejich srážce při snížené rychlosti k odrazení důsledkem odpuzivých sil a k vzájemné chemické reakci mezi nimi nedojde. Pokud dojde, ke zvýšení rychlosti molekul jsou potom tyto molekuly schopny překonat kinetickou bariéru odpuzivých sil a vzájemně spolu reagovat. Z technického hlediska nám zápalná teplota vyjadřuje, dostatečně vysokou rychlost molekul podmiňující vznik reakce. Další zvyšování rychlosti molekul zajistí reakční teplo vznikající při vzájemné reakci molekul a atomů. [10]

4.1.2 Vliv koncentrace

Vytvoříme-li hořlavou směs, kterou vznítíme, tvoří v aktuálním spalovacím prostoru spaliny a přebytečný vzduch. Pro udržení stabilního výkonu je nutné přivádět palivo a vzduch a neustále vytvářet hořlavou směs. Směsi vytváříme buď předmíslením ve směšovači a následným vznícením a hořením v hořáku (kinetické hoření) nebo mísení vzduchu a paliva přímo v plameni (difuzní hoření). Hořlavá směs hoří v určitém koncentračním intervalu nad i pod stechiometrickým složením. Tím byla stanovena dolní a horní mez zápalnosti, která je pro jednotlivé plyny různá. Mez zápalnosti souvisí s mechanismem hoření, takže jsou závislé na termodynamických veličinách. Limitní koncentrace je vyjádřena právě mezemi zápalnosti a teplota a tlak je ovlivňují. [10]



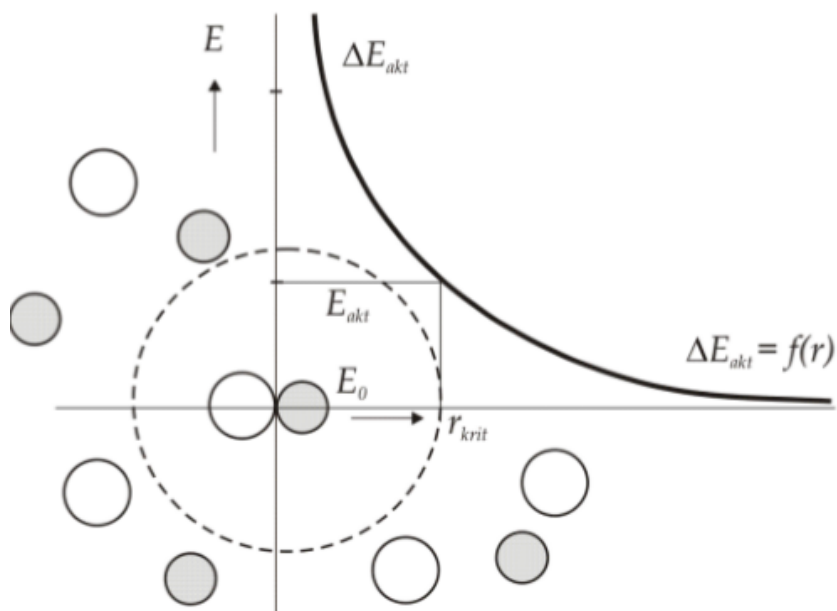
Obr. 17 Primární aktivace hořlavé směsi na dolní mezi zápalnosti [10]



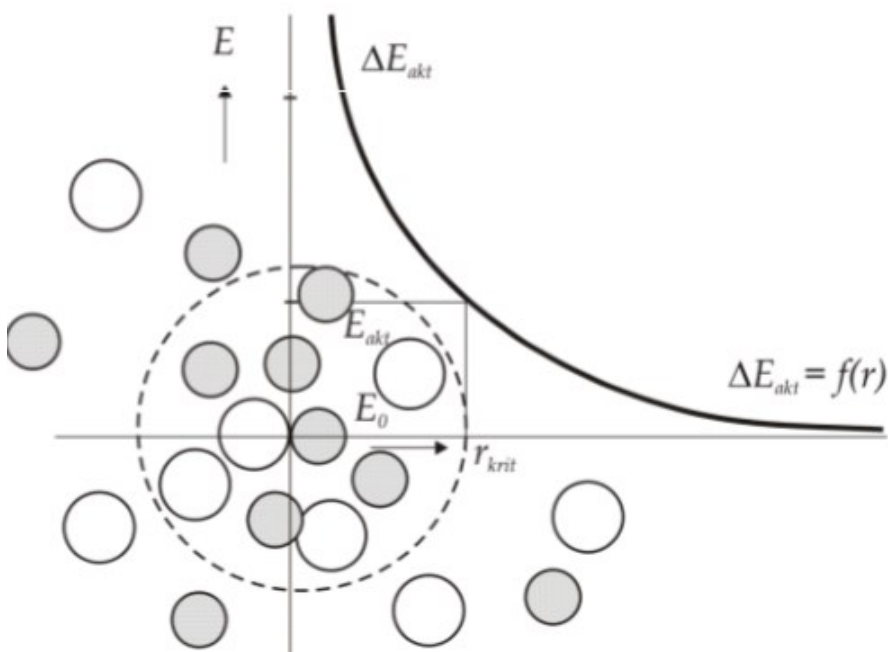
Obr. 18 Primární aktivace hořlavé směsi na horní mezi zápalnosti [10]

4.1.3 Vliv tlaku

Vliv tlaku na rychlost reakce se projevu tím, že se v prostoru aktivace bude měnit počet molekul. Při vyšším tlaku bude počet molekul větší a při tlaku nižším bude počet menší. V případě kritického (nízkého) tlaku se v daném prostoru nebudou vyskytovat molekuly, čímž nedojde k aktivaci a reakce se po primární aktivaci zastaví. [11]



Obr. 19 Primární aktivace hořlavé směsi při nízkém tlaku [11]



Obr. 20 Primární aktivace hořlavé směsi při vysokém tlaku [11]

4.2 Vznik a tvorba plynných emisí při spalování zemního plynu

Při spalování zemního plynu vzniká ve srovnání s pevnými nebo kapalnými palivy daleko méně škodlivin. Oxid siřičitý (SO_2) je ve spalínách obsažený v zanedbatelném množství a také emise oxidu uhelnatého (CO) a uhlovodíků jsou ve srovnání s ostatními palivy výrazně nižší. Jediným vážnějším problémem při spalování zemního plynu je vznik oxidů dusíku (NO_x). [12]

Vznik emisí NO_x

Směsi dusíku vznikají při spalování každého paliva v případě, že je pro spalování využíván vzduch. Zemní plyn oproti ostatním palivům ale neobsahuje žádné dusíkaté látky, takže oxidy dusíku vznikají pouze a jen ze vzdušného dusíku. U zemního plynu se můžeme setkat jenom s termickými NO_x . Jejich tvorba je závislá na teplotě spalování – čím je teplota vyšší, tím je vyšší tvorba NO_x .

Termické NO_x

Vznikají z molekul N_2 obsažených ve vzduchu, který je součástí spalování. Vlivem vysoké teploty je tento atmosférický dusík rozštěpen a s přítomnými atomy kyslíku vznikají oxidy dusíku. Jejich množství je závislé na teplotě spalování a na době zdržení ve spalovacím prostoru. Emise proto lze snížit vhodným uspořádáním spalování. Snižování emisí NO_x je věnována velká pozornost u výrobců plynových kotlů. Jedná se o různé konstrukční úpravy hořáků a spalovacích komor.

Palivo	Hnědé uhlí	Koks	Topný olej	Zemní plyn
NO_x (mg/MJ)	210	57,3	236,4	47,2

Vznik emisí CO_2

Zemní plyn jako každé uhlíkaté palivo je zdrojem oxidu uhličitého (CO_2). Ve srovnání s ostatními palivy jsou emise zemního plynu mnohonásobně menší. Je to dáno dobrým promísením paliva se vzduchem ve spalovací komoře a tím pádem lepším vyhořením a dále dobrou regulací procesu hoření. V Tab. 2 můžeme vidět porovnání emisí CO_2 u jednotlivých paliv.

Palivo	Hnědé uhlí	Koks	Topný olej	Zemní plyn
CO_2 (mg/MJ)	111	92	75	56

Tab. 2 Porovnání emisí CO_2 jednotlivých paliv

Minimalizace vzniku CO₂

- snížení spotřeby fosilních paliv
- použití paliv s nižším podílem uhlíku – zemní plyn
- technologie s vyšší účinností transformace energie
- využití energie z fosilních zdrojů – biomasa, obnovitelné zdroje

Vznik sazí

Vznikají při nedokonalém spalování paliva a sestávají jen z čistého uhlíku (C). Saze jsou využívány jako černé barvivo a využívá se v tiskařství, gumárenství nebo chemickém průmyslu. Technický uhlík (saze) se vyrábějí ve válcových reaktorech z těžkého topného oleje a zemním plynem předeřtého vzduchu. Vzniká jemná hmota, která se dále zahušťuje vodou. Po přidání vody se intenzivním mícháním dosáhne vzniku granulí s minimálním obsahem prachového podílu.

4.3 Statika spalování

Jedná se o proces spalování, kde rozhodující počáteční parametry jsou: vlastnosti paliva a vzduchu tedy okysličovadla. Tímto procesem zjistíme výstupními parametry spalovacího děje – a to množství produkce okysličením. Stechiometrické rovnice tuhých a kapalných paliv uvádíme jednotlivě i přes stejnou charakteristiku hořlaviny.

Pro výpočet objemu plynu vycházíme z molekulové hmotnosti jednotlivého prvku hořlaviny, kde jeden mol udává hmotnost látky v gramech odpovídající jeho molekulové hmotnosti. Podle Avogadrova zákona je ve stejném objemu plynu stejný počet molekul.

$$1 \text{ mol O}_2 = 22,39 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ mol N}_2 = 22,40 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ mol H}_2 = 22,42 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ mol CO} = 22,50 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ mol H}_2\text{O} = 22,40 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ mol CO}_2 = 22,26 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ mol SO}_2 = 21,89 \text{ m}^3$$

4. Praktická část diplomové práce

V praktické části diplomové práce jsou stanoveny fyzikální a spalovací vlastnosti ZP. Následně jsou předloženy stechiometrické výpočty pro tranzitní ZP., pro další druhy zemního plynu jsou výpočty uvedeny v příloze. V poslední části je navrženo několik konstrukčních variant hořáku, přičemž v závěru jsou prezentovány výsledky z experimentálních měření.

4.1 Stanovení fyzikálních a spalovacích vlastností zemního plynu

4.1.1 Hustota

Hustota zemního plynu nám udává hmotnost jednoho m^3 zemního plynu v kilogramech. Hustotu stanovíme výpočtem ze složení zemního plynu podle rovnice [1]. V Tab. 3 můžeme vidět jednotlivé hustoty zemních plynů.

$$\rho_n = \frac{\sum \rho_{ni} \cdot r_i}{100} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (4.1)$$

ρ_{ni} - hustoty jednotlivých složek zemního plynu při (0°C , 101 325 Pa) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

r_i - procentuální objemové podíly jednotlivých složek zemního plynu [%]

Druh zemního plynu	Hustota
Tranzitní ZP	0,73
Norský ZP	0,81
Alžírský ZP	0,8
Holandský ZP	0,78
USA ZP	0,72

Tab. 3 Vypočtené hustoty zemních plynů

4.1.2 Výhřevnost a spálené teplo zemního plynu

Výhřevnost: je definována jako množství tepla, uvolněné úplným spálením 1 m^3 zemního plynu při tlaku 101 325 Pa a teploty 0°C , za předpokladu že se spaliny ochladí na teplotu výchozích látek a vodní pára, obsažená ve spalinách, zůstane v plynném stavu. Jednotkou výhřevnosti je $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$.

Spálené teplo: je množství tepla, uvolněné úplným spálením 1 m³ zemního plynu při tlaku 101 325 Pa a teploty 0 °C, za předpokladu že se spaliny ochladí na teplotu výchozích látek a vodní pára, obsažená ve spalinách, zůstane v kapalném stavu. Výhřevnost a spálené teplo zemního plynu vypočteme ze složení zemního plynu podle rovnice (4.2) a (4.3). V Tab. 4 můžeme vidět jednotlivé výhřevnosti a spálená tepla zemních plynů.

$$Q_i^o = \frac{\sum Q_i^o \cdot r_i}{100} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (4.2)$$

$$Q_s^o = \frac{\sum Q_s^o \cdot r_i}{100} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (4.3)$$

Q_i^o - výhřevnost složky zemního plynu [kJ.m-3]

Q_s^o - spálené teplo složky zemního plynu [kJ.m-3]

r_i - procentuální objemový podíl složky zemního plynu [%]

Druh zemního plynu	Výhřevnost Q_i^o	Spálené teplo Q_s^o
	[kJ.m-3]	[kJ.m-3]
Tranzitní ZP	35871	38810
Norský ZP	39653	42965
Alžírský ZP	40883	44301
Holandský ZP	31669	34282
USA ZP	35822	38754

Tab. 4 Vypočtená výhřevnost a spálené teplo jednotlivých zemních plynů

4.1.3 Meze zápalnosti zemního plynu

Meze výbušnosti stejně jako meze vzplanutí jsou charakteristické pro každé plyny. Všechny hořlavé látky jsou ze směsí se vzduchem zapalitelné jen uvnitř oblasti výbušnosti. Je-li směs pod dolní hranicí výbušnosti, není ani výbušná ani hořlavá. Pokud je koncentrace směsi nad horní hranicí výbušnosti, je hořlavá jen za přístupu vzduchu a snadno se může stát výbušná po daném zředění se vzduchem. Meze zápalnosti vypočteme ze vztahu pro jednotlivé složky zemního plynu podle rovnice (4.4) a (4.5). Meze zápalnosti pro jednotlivé zemní plyny jsou uvedené v Tab. 5

Dolní mez zápalnosti

$$L_d = \frac{100}{\sum \frac{r_i}{L_{iD}} + \frac{m}{100}} [\%] \quad (4.4)$$

Horní mez zápalnosti

$$L_h = \frac{100}{\sum \frac{r_i}{L_{iH}} + \frac{m}{100}} [\%] \quad (4.5)$$

L_d, L_h - dolní, a horní mez zápalnosti zemního plynu [%]

L_{iD}, L_{iH} - meze zápalnosti jednotlivých hořlavých složek zemního plynu [%]

r_i - procentuální objemový podíl jednotlivých hořlavých složek zemního plynu [%]

m - součet procentuálních objemových podílů jednotlivých složek zemního plynu [%]

Druh zemního plynu	Dolní mez zápalnosti L_d [%]	Horní mez zápalnosti L_h [%]
Tranzitní ZP	5,2	13,4
Norský ZP	4,8	13,2
Alžírský ZP	4,7	12,9
Holandský ZP	5,9	15,6
USA ZP	5,2	13,3

Tab. 5 Vypočtené meze zápalnosti jednotlivých zemních plynů

4.1.4 Zápalná teplota

V procesu hoření paliv je zápalná teplota velmi důležitý pojem, protože představuje aktivaci molekul, které zajišťují stabilitu hoření. U plynů je zápalná teplota zcela jasná a představuje teplotu energické aktivace reagujících molekul. Zápalné teploty zemního plynu jsou uvedené na Obr. 1.5. Z uvedených hodnot zjistíme, že plyny s nejjednodušším mechanismem hoření mají složitější proces aktivace, vznícení a hoření v závislosti na dalších vlastnostech. Zápalnou teplotu vypočteme ze vztahu (4.6). Zápalné teploty jednotlivých zemních plynů jsou uvedeny v Tab. 6.

$$t_z = \frac{\sum t_{iz}^o \cdot r_i}{100} \quad (4.6)$$

t_{iz}^o – zápalná teplota jednotlivých složek zemního plynu [°C]

r_i – procentuální podíl jednotlivých složek v zemním plynu [%]

Zemní plyn	Zápalná teplota t_z [°C]
Tranzitní	589
Norský	569
Alžírský	580
Holandský	501
USA	594

Tab. 6 Vypočtené zápalné teploty zemního plynu

4.1.5 Wobbeho číslo

Wobbeho číslo je základním faktorem pro porovnání zemních plynů a vyjadřuje podmínku zachování tepelného příkonu spotřebiče při změně spalovacích vlastností zemního plynu. Wobbeho číslo vypočteme podle vztahu (4.7). V Tab. 7 vidíme jednotlivé hodnoty Wobbeho čísla pro zadané druhy zemního plynu.

$$W_s^o = \frac{Q_s^o}{\sqrt{d}} \quad (4.7)$$

Q_s^o - spálené teplo složky zemního plynu [kJ.m-3]

\sqrt{d} - poměrná hustota zemního plynu [-]

Poměrnou hustotu zemního plynu stanovíme ze vztahu:

$$d = \frac{\rho_n}{1,293} \quad (4.8)$$

ρ_n - hustota zemního plynu při (0°C, 101 325 Pa) [kg · m⁻³]

Zemní plyn	Wobbeho číslo [kJ.m-3]
Tranzitní	51738
Norský	54322
Alžírský	56219
Holandský	44045
USA	51899

Tab. 7 Vypočtené hodnoty Wobbeho čísla pro jednotlivé zemní plyny

4.2 Stechiometrické výpočty

Pro stochiometrické výpočty byl použit tranzitní zemní plyn, jehož složení je uvedeno v Tab. 8. Výsledky dalších druhů plynu jsou uvedeny v Příloze 1.

Složky	Tranzitní složení [%]
Methan CH_4	98,39
Etan C_2H_6	0,44
Propan C_3H_8	0,16
Butan C_4H_{10}	0,07
Pentan C_5H_{12}	0,03
Dusík N_2	0,84
Oxid uhličitý CO_2	0,07

Tab. 8 Složení tranzitního zemního plynu

Stechiometrická potřeba kyslíku

Nejprve se stanoví jednotlivé spotřeby kyslíku pro spálení všech uhlovodíků obsažených v zemním plynu. Obecná rovnice lze zapsat takto:

$$\frac{V_{O_2}}{V_{C_xH_y}} = \frac{x_{C_xH_y}}{100} \cdot K_{O_2} \quad (4.9)$$

V_{O_2}	potřebný objem kyslíku [m_N^3]
$V_{C_xH_y}$	objem daného uhlovodíku [m_N^3]
$x_{C_xH_y}$	objemová koncentrace daného uhlovodíku v zemním plynu [%]
K_{O_2}	koeficient tvorby kyslíku daného uhlovodíku [m_N^3 / m_N^3]

Složka ZP	Koncentrace [%obj.]	Koeficienty spotřeby kyslíku [kmol/kmol]
CH ₄	98,39	2
C ₂ H ₆	0,44	3,5
C ₃ H ₈	0,16	5
C ₄ H ₁₀	0,07	6,5
C ₅ H ₁₂	0,03	8
N ₂	0,84	0
CO ₂	0,07	0

Tab. 9 Koeficienty tvorby kyslíku daného uhlovodíku

Přítok topného plynu

$$V_{pl} = \frac{P}{Q_{i,pl}} = \frac{4}{35871} = 0,0001158 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.10)$$

Minimální množství kyslíku potřebné pro dokonalé spálení 1m³ plynu

$$V_{O_2} = \sum \left(X + \frac{Y}{4} \right) \cdot O_{C_X H_Y} - O_{O_2}$$
$$V_{O_2} = \left(1 + \frac{4}{4} \right) \cdot \frac{98,39}{100} + \left(2 + \frac{6}{4} \right) \cdot \frac{0,44}{100} + \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot \frac{0,16}{100} + \left(4 + \frac{10}{4} \right) \cdot \frac{0,07}{100} + \left(5 + \frac{12}{4} \right) \cdot \frac{0,03}{100} \quad (4.11)$$
$$V_{O_2} = 1,998 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Minimální množství suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1m³ plynu

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2}}{0,21} = \frac{1,998}{0,21} = 9,515 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (4.12)$$

Skutečné množství vzduchu

$$V_{vz,s}^s = V_{vz,t}^s \cdot n = 9,515 \cdot 1,2 = 11,42 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (4.13)$$

Skutečné množství vlhkého vzduchu

$$V_{vz,s}^v = V_{vz,s}^s \cdot v = 11,42 \cdot 1,03 = 11,77 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (4.14)$$

Objem suchých spalin

$$V_{sp,s}^s = V_{CO_2} + V_{N_2} + (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 0,99 + 7,53 + (1,2 - 1) \cdot 9,515 = 10,42 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (4.15)$$

Objem oxidu uhličitého ve spalinách

$$V_{CO_2} = \Omega_{CO} + \Omega_{CO_2} + \sum X \Omega_{C_X H_Y} + 2,6 \Omega_{C_X H_Y}$$
$$V_{CO_2} = \frac{0,007 + (98,39 + 0,44 + 0,16 + 0,07 + 0,03)}{100} \quad (4.16)$$
$$V_{CO_2} = 0,99 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Objem dusíku ve spalinách

$$V_{N_2} = +\Omega_{N_2} + 0,79 V_{vz,t}^s = \frac{0,84}{100} + 0,79 \cdot 9,515 = 7,53 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (4.17)$$

Vlhkost ve spalínách

$$V_{H_2O} = \Omega_{H_2} + \sum \frac{Y}{2} \Omega_{C_X H_Y} + 2,4 \Omega_{C_M H_N} + (v - 1) \cdot V_{vz,t}^s \cdot n$$
$$V_{H_2O} = \left(\frac{4}{2} \cdot \frac{98,39}{100} \right) + \left(\frac{6}{2} \cdot \frac{0,44}{100} \right) + \left(\frac{8}{2} \cdot \frac{0,16}{100} \right) + \left(\frac{10}{2} \cdot \frac{0,07}{100} \right) + \left(\frac{12}{2} \cdot \frac{0,03}{100} \right) + (1,03 - 1) \cdot 9,515 \cdot 1,2 \quad (4.18)$$

$$V_{H_2O} = 2,34 \, m_N^3 \cdot m_N^{-3}$$

Skutečné množství vlhkých spalín

$$V_{sp,s}^v = V_{sp,s}^s + V_{H_2O} = 10,42 + 2,34 = 12,76 \, m_N^3 \cdot m_N^{-3} \quad (4.19)$$

Koncentrace jednotlivých složek ve spalínách

$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{0,99}{12,76} \cdot 100 = 7,76 [\%] \quad (4.20)$$

$$\omega_{N_2} = \frac{V_{N_2,pal} + 0,79 V_{vz,t}^s \cdot n}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{0,0084 + 0,79 \cdot 9,515 \cdot 1,2}{12,76} \cdot 100 = 70,8 [\%] \quad (4.21)$$

$$\omega_{O_2} = \frac{0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 9,515}{12,76} \cdot 100 = 3,13 [\%] \quad (4.22)$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{2,34}{12,76} \cdot 100 = 18,34 [\%] \quad (4.23)$$

Objemový přítok vzduchu

$$V_{vz,s}^v = V_{vz,s}^v \cdot V_{pl} = 11,77 \cdot \frac{0,029}{100} = 0,0034 \, m_N^3 \cdot s^{-1} \quad (4.24)$$

Objemový tok spalín

$$V_{sp,s}^v = V_{sp,s}^v \cdot V_{pl} = 12,76 \cdot \frac{0,029}{100} = 0,0037 \, m_N^3 \cdot s^{-1} \quad (4.25)$$

Teoretická teplota spalín

$$a_{sp} = \sum_{i=1}^{i=n} a_i \cdot \omega_i$$

$$a_{sp} = (1,32107 \cdot 0) + (1,28392 \cdot 0,708) + (1,73614 \cdot 0,0776) + (1,47301 \cdot 0) \quad (4.26)$$

$$a_{sp} = 1,04$$

$$b_{sp} = \sum_{i=1}^{i=n} b_i \cdot \omega_i$$

$$b_{sp} = (0,000141614 \cdot 0) + (0,000108509 \cdot 0,708) + (0,000413123 \cdot 0,0776) + (0,000250404 \cdot 0) \quad (4.27)$$

$$b_{sp} = 0,000109$$

$$i_{sp} = \frac{Q_i^r}{V_{sp,s}^v} = \frac{33480}{12,76} = 2624,84 \text{ kJ} \cdot \text{m}_N^3 \quad (4.28)$$

$$t_{sp,max} = \frac{-a_{sp} \pm \sqrt{a_{sp}^2 - 4b_{sp}(-i_{sp})}}{2b_{sp}}$$

$$t_{sp,max} = \frac{-1,04 \pm \sqrt{1,04^2 - 4 \cdot 0,000109 \cdot (-2624,84)}}{2 \cdot 0,000109} = 1755,41 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.29)$$

Entalpie

$$\text{kyslík} - i_{O_2} = 1,32107t + 0,000141614t^2,$$

$$\text{dusík} - i_{N_2} = 1,28392t + 0,000108509t^2,$$

$$\text{oxidu uhličitého} - i_{CO_2} = 1,73614t + 0,000413123t^2,$$

$$\text{a vody} - i_{H_2O} = 1,47301t + 0,000250404t^2.$$

4.3 Výpočty pro další varianty tranzitního zemního plynu

V Tab. 10 jsou uvedeny výpočty pro další zadané parametry. Výpočty pro další druhy zemních plynů jsou přiloženy v příloze.

Tranzitní zemní plyn	Výkon hořáku P=6 kW		Přebytky vzduchu				
			n=1	n=1,05	n=1,1	n=1,15	n=1,2
		V_{pl}	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167
		$V_{vz,t}^s$	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62
		$V_{vz,s}^s$	9,62	10,10	10,58	11,06	11,54
		$V_{vz,s}^v$	9,91	10,40	10,90	11,40	11,89
		$V_{sp,s}^s$	8,60	9,08	9,56	10,04	10,52
		V_{co2}	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
		V_{N2}	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64
		V_{H2O}	2,27	2,28	2,30	2,31	2,33
		$V_{sp,s}^v$	10,87	11,36	11,86	12,35	12,85
		ω_{CO_2}	8,82	8,44	8,09	7,76	7,46
		ω_{N_2}	70,31	70,59	70,84	71,08	71,30
		ω_{O_2}	0,00	0,89	1,70	2,45	3,14
		ω_{H_2O}	20,87	20,08	19,37	18,71	18,10
		$V_{vz,s}^v$	0,00166	0,00174	0,00182	0,00191	0,00199
		$V_{sp,s}^s$	0,00144	0,00152	0,00160	0,00168	0,00176
		tSP,max	2011,49	1940,64	1874,66	1813,06	1755,41
	Výkon hořáku P=8 kW		Přebytky vzduchu				
			n=1	n=1,05	n=1,1	n=1,15	n=1,2
		V_{pl}	0,000223	0,000223	0,000223	0,000223	0,000223
		$V_{vz,t}^s$	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62
		$V_{vz,s}^s$	9,62	10,10	10,58	11,06	11,54
		$V_{vz,s}^v$	9,91	10,40	10,90	11,40	11,89
		$V_{sp,s}^s$	8,60	9,08	9,56	10,04	10,52
		V_{co2}	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
		V_{N2}	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64
		V_{H2O}	2,27	2,28	2,30	2,31	2,33
		$V_{sp,s}^v$	10,87	11,36	11,86	12,35	12,85
		ω_{CO_2}	8,82	8,44	8,09	7,76	7,46
		ω_{N_2}	70,31	70,59	70,84	71,08	71,30
		ω_{O_2}	0,00	0,89	1,70	2,45	3,14
		ω_{H_2O}	20,87	20,08	19,37	18,71	18,10
		$V_{vz,s}^v$	0,00221	0,00232	0,00243	0,00254	0,00265
		$V_{sp,s}^s$	0,00192	0,00203	0,00213	0,00224	0,00235
		tSP,max	2011,49	1940,64	1874,66	1813,06	1755,41
	Výkon hořáku P=10 kW		Přebytky vzduchu				
			n=1	n=1,05	n=1,1	n=1,15	n=1,2
		V_{pl}	0,000279	0,000279	0,000279	0,000279	0,000279
		$V_{vz,t}^s$	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62
		$V_{vz,s}^s$	9,62	10,10	10,58	11,06	11,54
		$V_{vz,s}^v$	9,91	10,40	10,90	11,40	11,89
		$V_{sp,s}^s$	8,60	9,08	9,56	10,04	10,52
		V_{co2}	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
		V_{N2}	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64
		V_{H2O}	2,27	2,28	2,30	2,31	2,33
		$V_{sp,s}^v$	10,87	11,36	11,86	12,35	12,85
		ω_{CO_2}	8,82	8,44	8,09	7,76	7,46
		ω_{N_2}	70,31	70,59	70,84	71,08	71,30
		ω_{O_2}	0,00	0,89	1,70	2,45	3,14
		ω_{H_2O}	20,87	20,08	19,37	18,71	18,10
		$V_{vz,s}^v$	0,00276	0,00290	0,00304	0,00318	0,00331
		$V_{sp,s}^s$	0,00240	0,00253	0,00267	0,00280	0,00293
		tSP,max	2011,49	1940,64	1874,66	1813,06	1755,41

Tab. 10 Výpočty pro tranzitní zemní plyn

4.4 Návrh první konstrukční varianty hořáku

Hořák se bude skládat z hlavních částí a to z těla hořáku a z regulační tvarovky. Tvarovka hořáku je umístěna na přívodní trubce plynu. Tvarovka je vyrobena ze žáruvzdorného materiálu a je položena na podložku, která je k trubce přivařena. Podložka zároveň slouží jako víříč primárního vzduchu v těle hořáku. V dolní části hořáku je přívod primárního vzduchu. Materiál pro výrobu tvarovky kužele, navrhuji keramiku na bázi oxidu hlinitého, která má pracovní teplotu 1400°C. Zbylé části hořáku bych vyrobil z korozi-vzdorné oceli.

Stanovení minimálního množství přiváděného plynu

$$P = \frac{Q_{i,pl} \cdot \dot{V} \cdot \eta_{spal}}{3,6} \rightarrow \quad (4.30)$$

$$V = \frac{P \cdot 3,6}{Q_{i,pl} \cdot \eta_{spal}} = \frac{4 \cdot 3,6}{35,871 \cdot 0,96} = 0,418 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1} \quad (4.31)$$

Popis první konstrukční varianty

Tvarovka hořáku bude mít tvar komolého kuželu. Kde výška kužele bude 40 mm. Malý průměr bude 25 mm a velký 50 mm. Průměr těla hořáku je 50 mm. Posouváním regulační tvarovky ve směru osy hořáku, zvětšujeme nebo snižujeme výtokovou plochu a tím tedy rychlost. Budeme zjišťovat výtokový průřez a zdvih regulačního kužele. Při zavření hořáku bude zdvih nulový, při maximálním otevření bude zdvih roven výšce kužele. Pro návrh volím výtokovou rychlost 1,07 m·s⁻¹.

Objemové množství plynu

$$\dot{V}_c = \frac{\dot{V}}{3600} \cdot \frac{P_n}{P_c} \cdot \frac{T}{T_n} \quad (4.32)$$

$$\dot{V}_c = \frac{0,963}{3600} \cdot \frac{101325}{99600} \cdot \frac{273,15 + 650}{273,15} = 0,000116 \text{ m}_N^3 \cdot s^{-1}$$

Výtokový průřez

$$S_{vyt} = \frac{\dot{V}_c}{c_{pož}} = \frac{0,00116}{1,07} = 0,000109 \text{ m}^2 \quad (4.33)$$

Plocha pro vnitřní průměr trubky

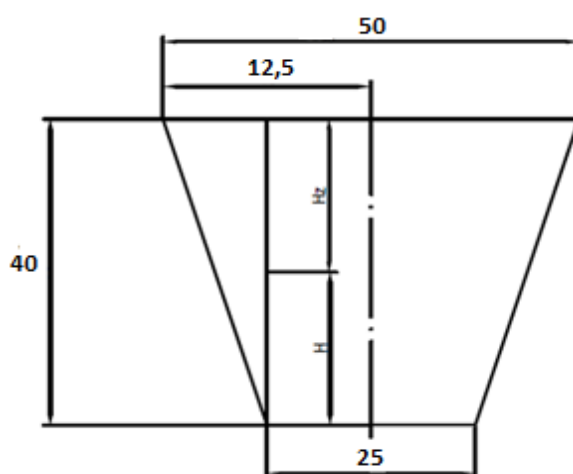
$$S_{trh} = \frac{\pi \cdot d_{trh}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,05^2}{4} = 0,00196 \text{ m}^2 \quad (4.34)$$

Plocha pro regulační kužel v těle hořáku

$$S_{rk} = S_{trh} - S_{vyt} = 0,00196 - 0,000109 = 0,001854 \text{ m}^2 \quad (4.35)$$

A z plochy S_{rk} určím průměr

$$d_{rk} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{rk}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,001854}{\pi}} = 0,4859 \text{ m} \quad (4.36)$$



Obr. 21 Rozměr regulačního kužele

Z podobnosti trojúhelníků vyplývá tento vztah

$$\frac{40}{12,5} = \frac{h}{\frac{d_{rk} - 25}{2}} \quad (4.37)$$

Zdvih je vzdálenost mezi plochou největšího průřezu regulačního kužele a plochou, kterou proudí plyn. Úpravou vzorce získáme zdvih:

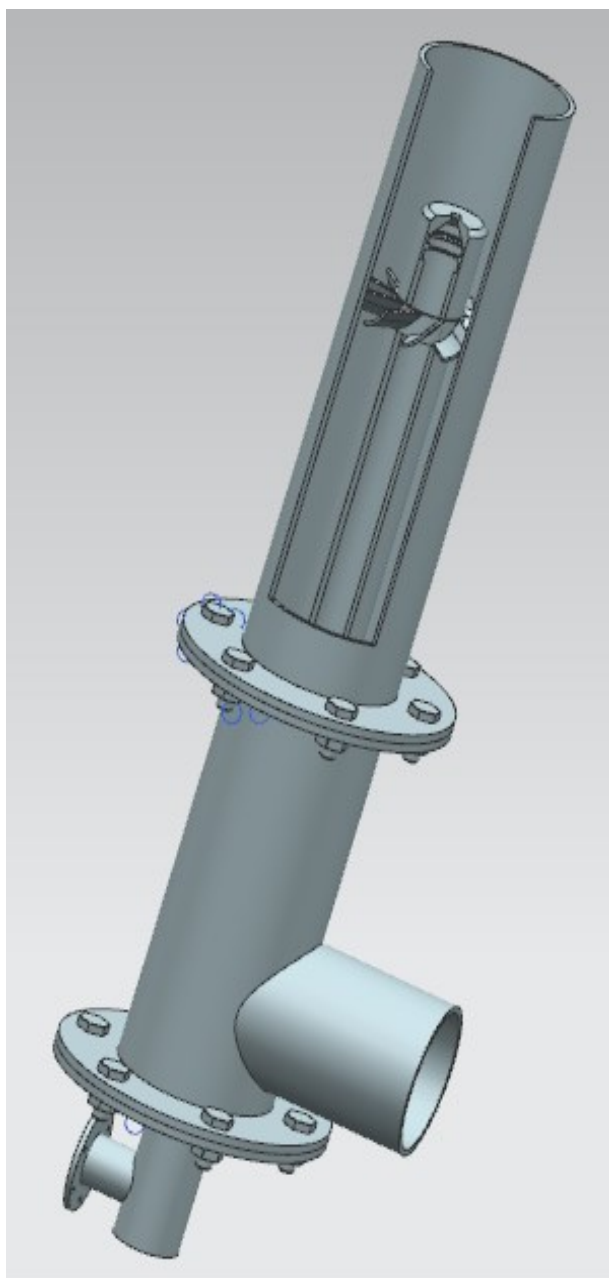
$$h_z = 40 - \left(\frac{40}{12,5} \cdot \frac{d_{rk} - 25}{2} \right) = 40 - \left(\frac{40}{12,5} \cdot \frac{49 - 25}{2} \right) \quad (4.38)$$

$$h_z = 1,6 \text{ mm}$$

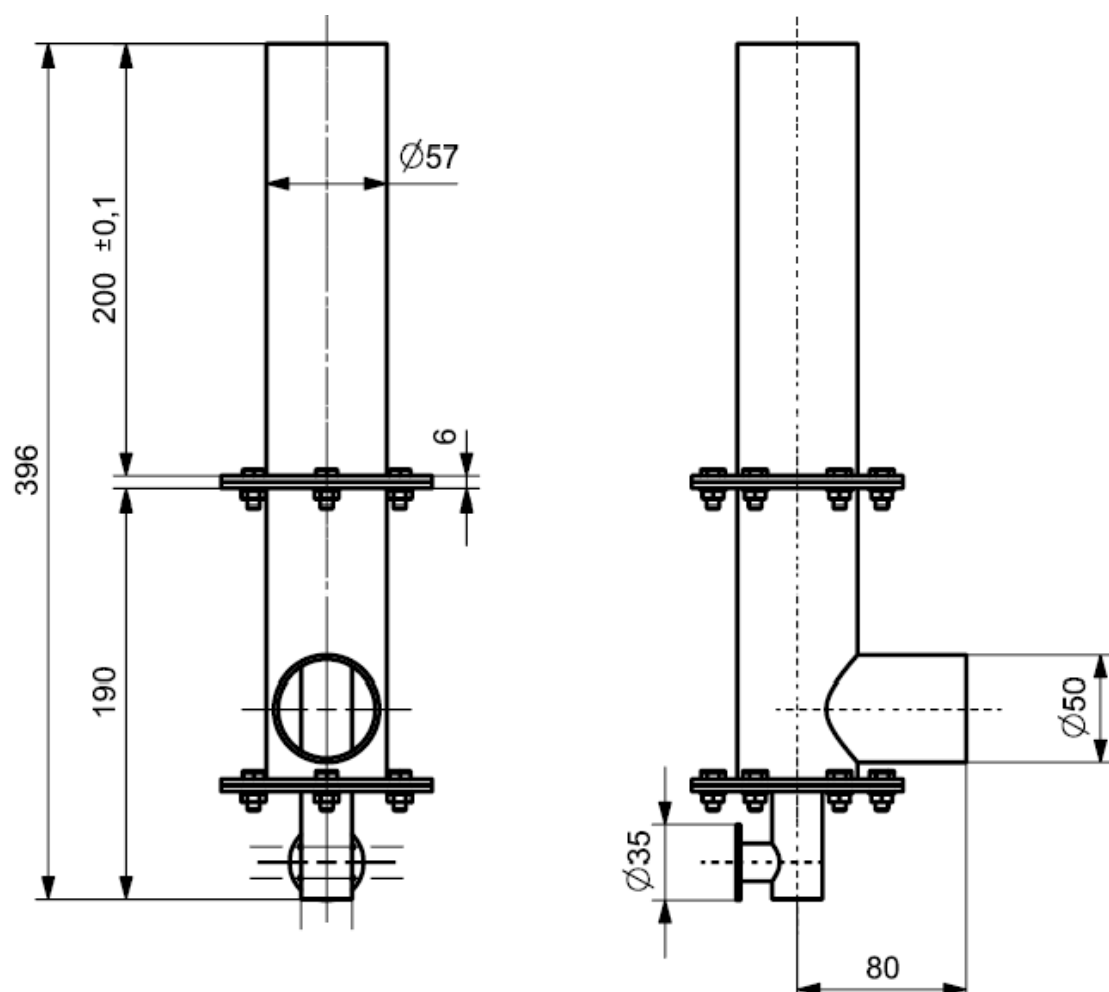
Pro objemový tok paliva $0,000232 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}$ vychází zdvih regulačního kužele 1,6 mm a pro zadané parametry nelze použít tuto konstrukční variantu, jak je uvedeno v literatuře [5].

4.5 Návrh druhé konstrukční varianty

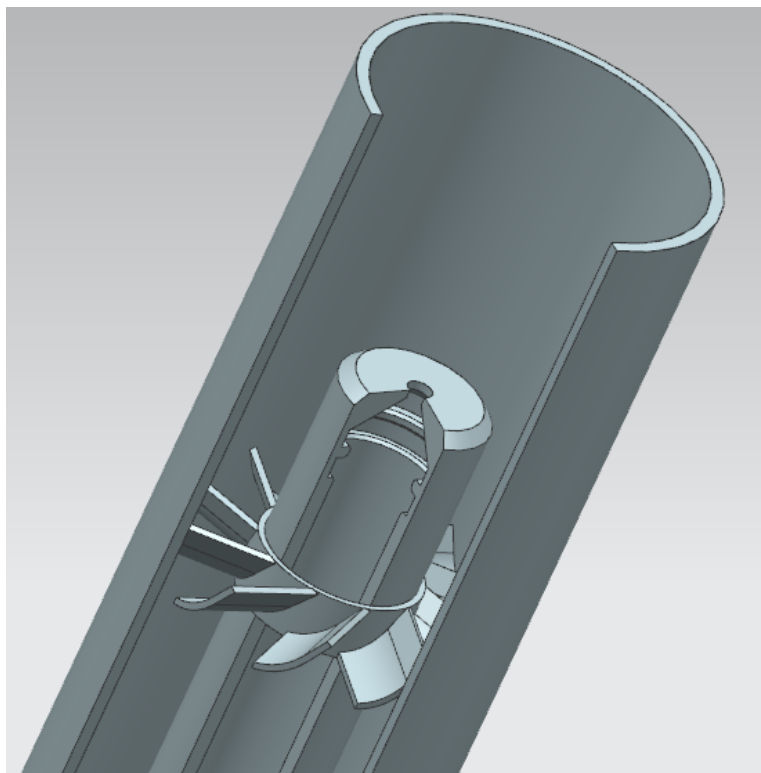
Pro druhou konstrukční variantu, jsem zvolil hořák s nuceným přívodem vzduchu. Hořák se skládá z přívodního potrubí pro plyn a přívodního potrubí primárního vzduchu. Ve vnitřní části hořáku je umístěn víříč plamene, který má za úkol stabilizovat plamen a dodatečně napomáhat snížit produkci NO_x vznikajících při hoření. V této konstrukční variantě se jedná o víříč s lopatkami pevně umístěnými do proudu vzduchu. Zvolené rozměry a detail víříče jsou na Obr. 24 a Obr. 25. Je zvolen standardní úhel natočení lopatek 55° . Varianta hořáku byla odzkoušena na experimentálním zařízení a výsledky z měření jsou uvedeny v kapitole 5.2. Model a výkres druhé varianty jsou uvedeny na Obr. 22 a Obr. 23.



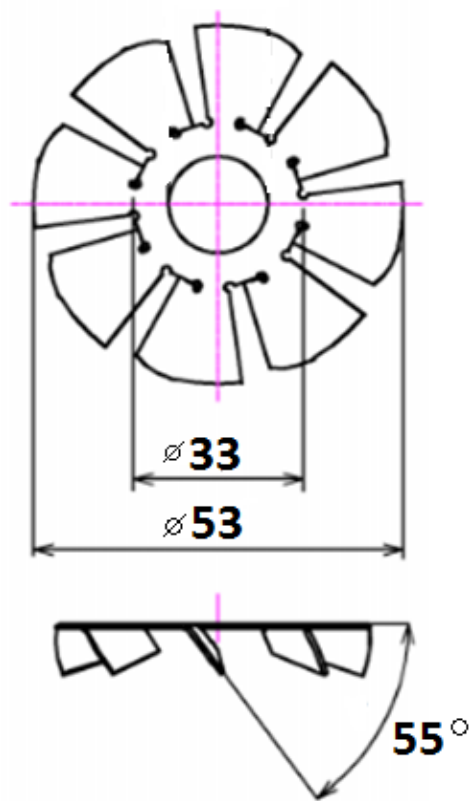
Obr. 22 Model druhé konstrukční varianty



Obr. 23 Rozměry těla hořáku druhé a třetí konstrukční varianty



Obr. 24 Detail vířiče pro druhou konstrukční variantu



Obr. 25 Rozměry vříče vzduchu [13]

Spotřeba plynu:

$$V_{pl(n)} = \frac{P}{Q_i} = \frac{4 \cdot 3600}{35871} = 0,401 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1} = 0,000112 \text{ m}_N^3 \cdot s^{-1} \quad (4.39)$$

Skutečný stav plynu před hořákem:

$$V_{pl} = V_{pl(n)} \cdot \frac{P_n \cdot T}{T_n \cdot P} \quad (4.40)$$

$$V_{pl} = 0,602 \cdot \frac{101325 \cdot 303,15}{273,15 \cdot 101825} = 0,443 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1} = 0,000123 \text{ m}_N^3 \cdot s^{-1}$$

Skutečná spotřeba spalovacího vzduchu:

$$V_{vzd} = V_{pl(n)} \cdot V_{vzd-min} \cdot n \cdot \frac{P_n \cdot T}{T_n \cdot P}$$

$$V_{vzd} = 0,5781 \cdot 9,515 \cdot 1,2 \cdot \frac{101325 \cdot 303,15}{273,15 \cdot 101825} \quad (4.41)$$

$$V_{vzd} = 5,062 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1} = 0,0014 \text{ m}_N^3 \cdot s^{-1}$$

Stanovení průměru přípojného potrubí plynu k hořáku: (4.42)

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{pl}}{\pi \cdot c_{pl}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000123}{\pi \cdot 1,09}} = 0,12 \text{ m volím} \rightarrow \varnothing 15 \text{ mm}$$

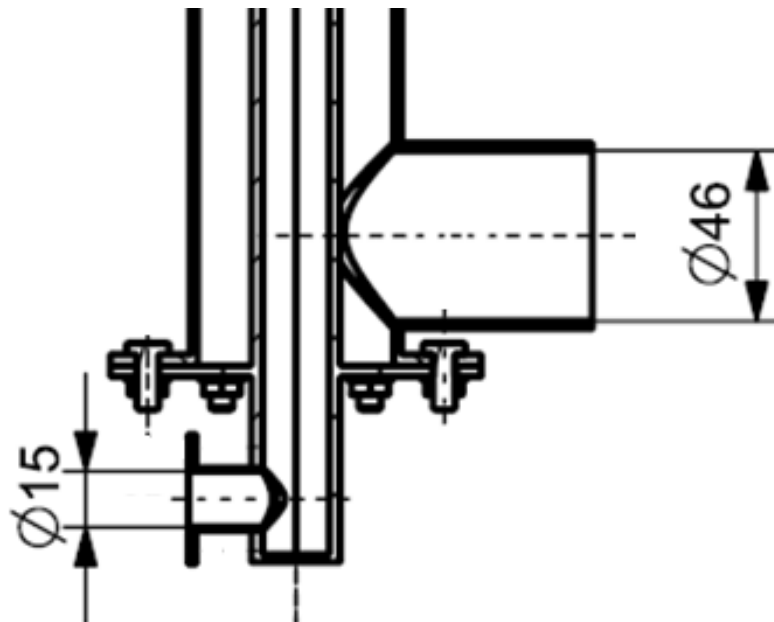
Stanovení průměru přípojného potrubí vzduchu k hořáku: (4.43)

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{vzd}}{\pi \cdot c_{vzd}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0014}{\pi \cdot 1,07}} = 0,405 \text{ m volím} \rightarrow \varnothing 46 \text{ mm}$$

$$c_{pl} = 1,09 \text{ m}_N^3 \cdot s^{-1}$$

$$c_{vzd} = 1,07 \text{ m}_N^3 \cdot s^{-1}$$

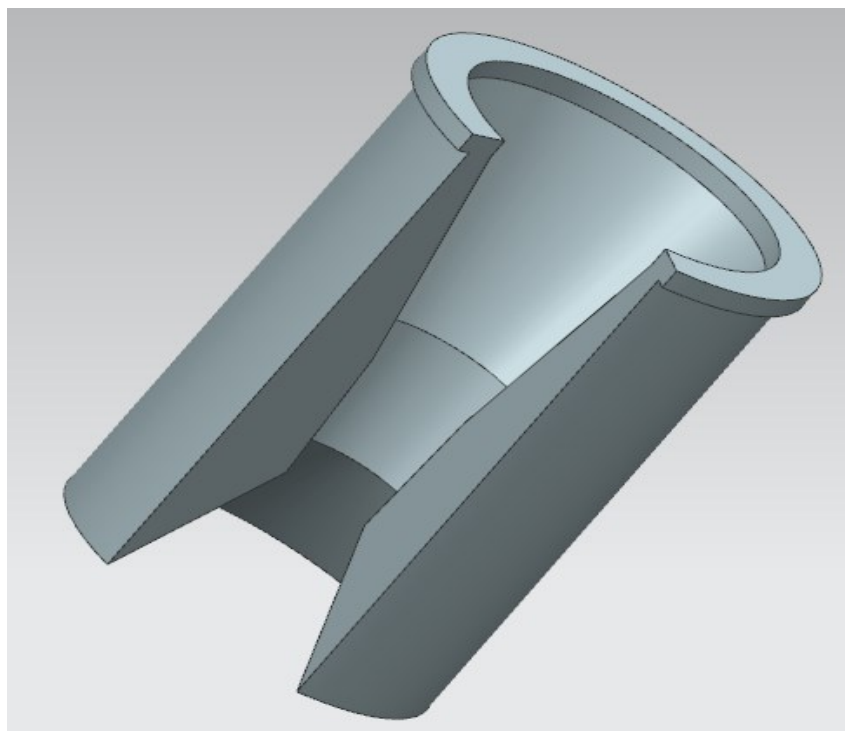
Na Obr. 26 vidíme detail hořáku a přípojného potrubí.



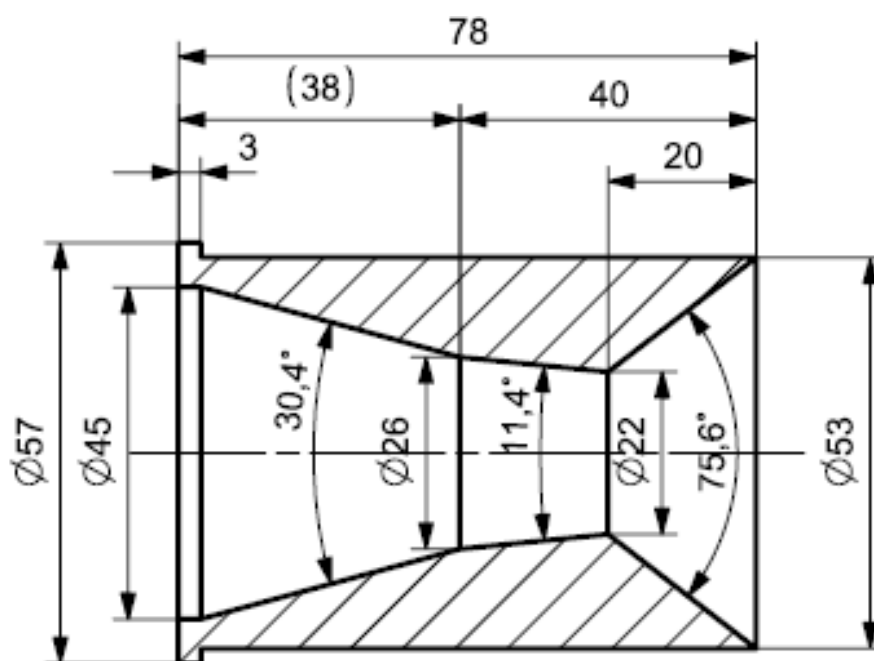
Obr. 26 Schéma přívodního potrubí do těla hořáku

4.6 Návrh třetí konstrukční varianty

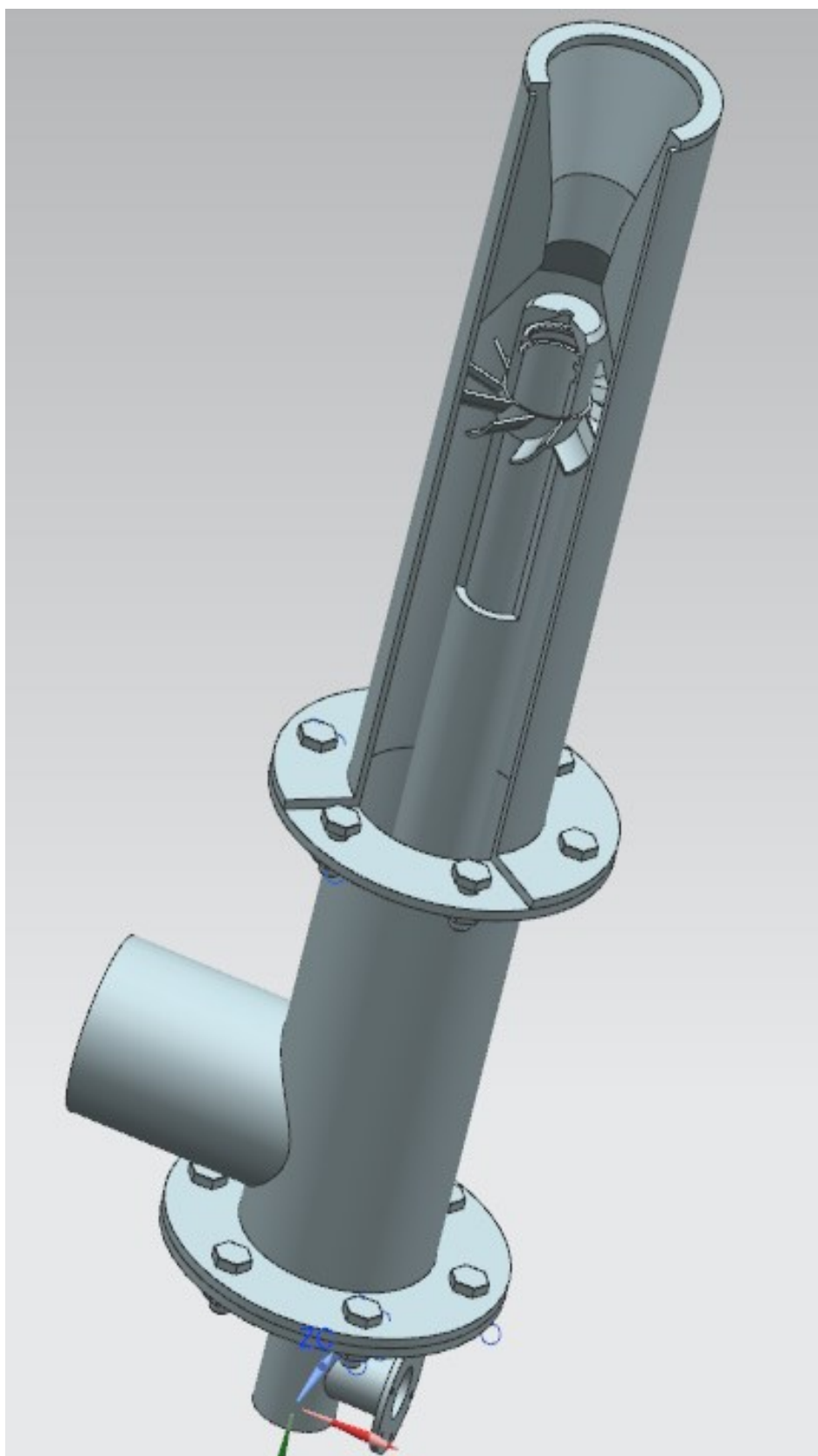
Jedná se o vylepšenou verzi druhé konstrukční varianty. Z důvodu zintenzivnění promíšení topného plynu a vzduchu byl navržen nový segment, jež je umístěn v ústí hořáku. Detail segmentu a rozměrový výkres je na Obr. 27 a Obr 28. Varianta hořáku byla stejně jako druhá varianta odzkoušena na experimentálním zařízení a výsledky z měření jsou uvedeny níže. Model třetí varianty je uveden na Obr. 29.



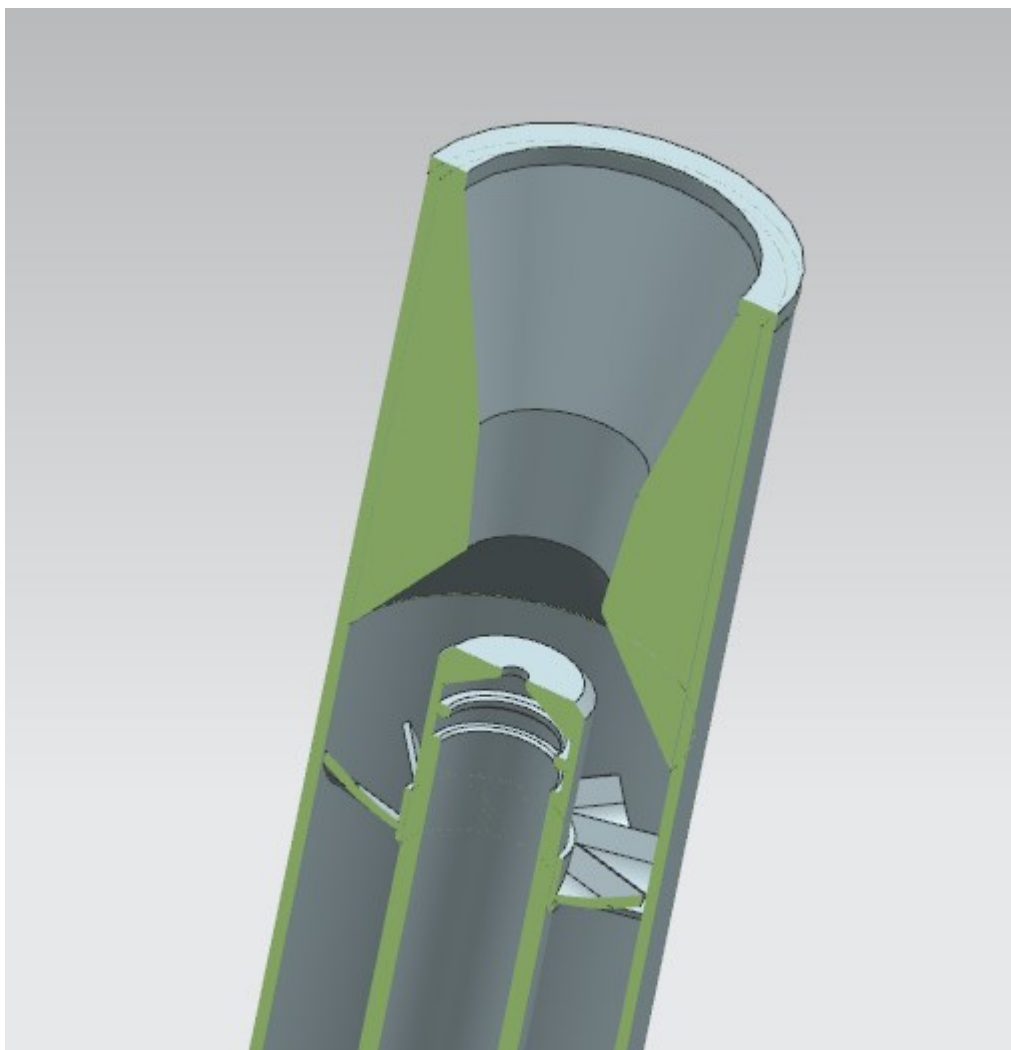
Obr. 27 Model segmentu pro třetí konstrukční variantu



Obr. 28 Rozměry segmentu pro třetí konstrukční variantu



Obr. 29 Model třetí konstrukční varianty



Obr. 30 Detail umístění segmentu

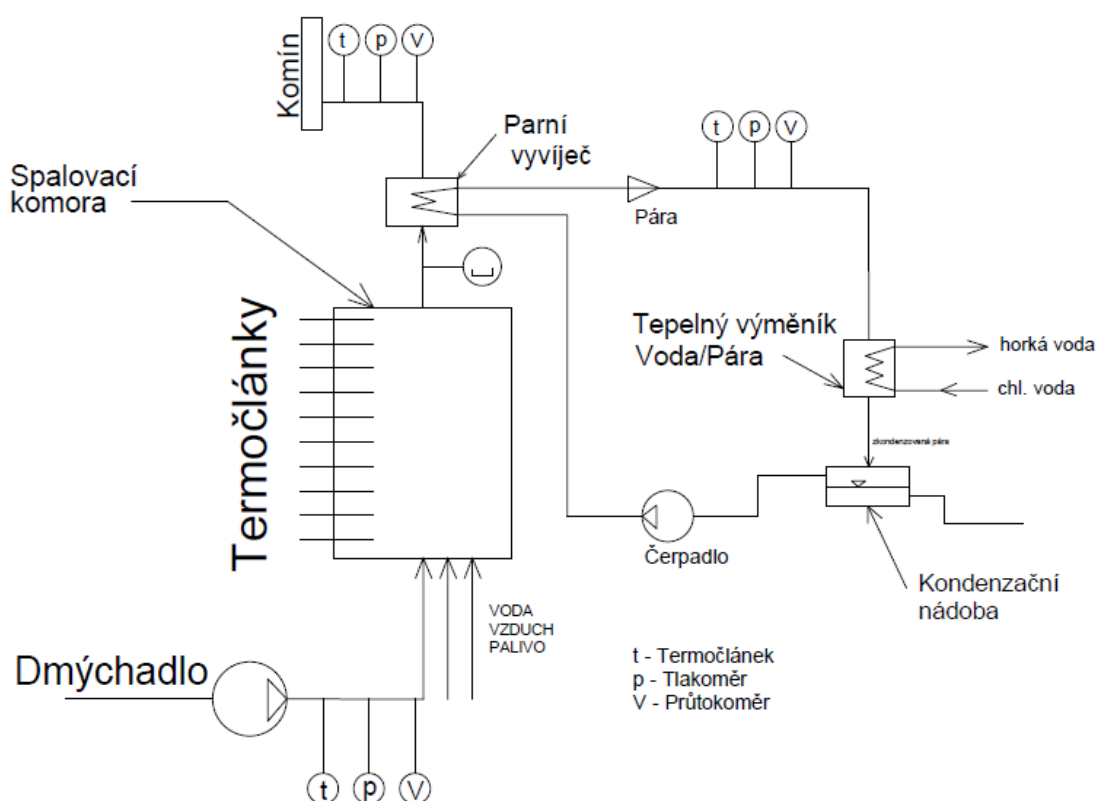
5. Experimentální ověření

Součástí diplomové práce bylo provedení měření na spalovacím zařízení s cílem posoudit navržené hořáky tj. druhou a třetí konstrukční variantu z hlediska produkce emisí.

5.1 Návrh experimentu

Experiment proběhl dne 22. 3. 2016 v laboratoři tepelných procesů a proudění spadající pod centrum ENET a katedru energetiky v Ostravě. V době měření bylo spalován tranzitní zemní plyn.

Schéma spalovací komory



Obr. 31 Schéma spalovacího zařízení

Měřené veličiny

Během experimentu byly měřeny tyto veličiny. Množství škodlivin (CO , CO_2 , NO , NO_2 , SO_2) a dále teplota spalin (T). Pro stanovení množství škodlivin ve spalinách bylo měření prováděno ve spalovací komoře pomocí otvorů diagonálně umístěných po délce spalovací komory pro vyhodnocení množství koncentrace spalin. Koncentrace byly měřeny kontinuálním analyzátozem pracujícím na principu paramagnetických vlastností kyslíku. Odběr vzorků spalin byl uskutečňován pomocí sondy s filtrem pro odloučení tuhých částic, za kterým bylo připojeno vedení vzorku, které bylo vyvedeno do odlučovače kondenzátu, ve kterém došlo k odloučení zkondenzovaných složek spalin, aby se zabránilo jejich kontaktu s měřicí komorou analyzátoru. Takto upravené vlhké spaliny byly zavedeny do analyzátoru, který byl před měřením kalibrován.

Volba měřících míst

Pro měření množství škodlivin byly na spalovací komoře umístěny diagonální otvory po celé délce spalovací komory. Délka měření pro jednotlivý daný úsek byl 2 minuty.

Použitá měřidla

Testo 350

Přístroj je složen z odběrové sondy, kontrolní jednotky a analyzačního boxu. Analyzátor spalin má třídu ochrany IP 40. Analyzační box může mít připojen až 6 senzorů na měření emisí (CO , CO_2 , NO , NO_2 , SO_2 , H_2S , O_2 nebo C_xH_y) Analyzátor umožňuje neomezená měření i při vysokých koncentracích plynů. Při vysokých koncentracích se automaticky aktivuje ředění. Součástí je také úpravna plynu (Peltier), který zajišťuje automatický odvod kondenzátu při dlouhodobých měřeních. Analyzační boxy pracují buď jako samostatné analyzátoři (záznamníky) nebo mohou být připojeny přes datovou sběrnici. Tímto přístrojem byly měřeny teploty a množství škodlivin (CO , CO_2 , NO , NO_2 , SO_2)



Obr. 32 Analyzátor spalin Testo 350 [20]

Sierra 820

Princip funkce snímačů je založen na přenosu tepla a prvním zákonu termodynamiky. Měřený plyn vstupuje do přístroje a dělí se do dvou průtokových cest. Jedna vede trubici snímače, na druhé, která vede obtokem s laminárním prouděním, vzniká úbytek tlaku ΔP , který nutí malou část projít trubicí snímače. Dvě cívky s odporovým snímačem teploty navinuté okolo trubice snímače přivádějí konstantní množství tepla do proudu plynu. Výsledný rozdíl teplot se detekuje cívkami s odporovým snímačem teploty a vzniká výstupní signál. Je výstupní signál lineárně úměrný hmotnostnímu průtoku plynu.



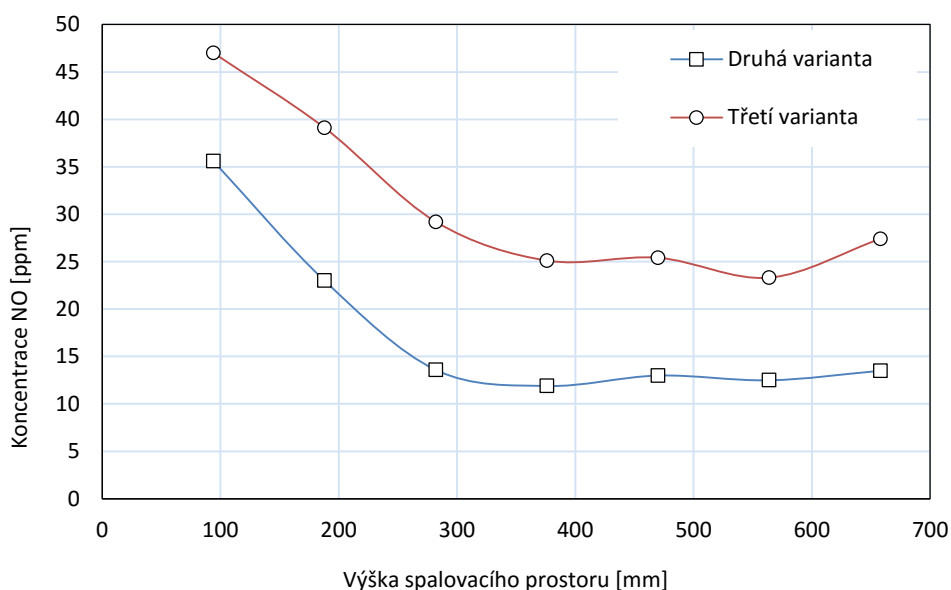
Obr. 33 Hmotnostní průtokoměr Sierra 820 [21]

5.2 Výsledky experimentu

Během celého měření byla teplota okolí 20 °C. Měření probíhalo celkem v sedmi výškových úrovních od ústí hořáku a sice: 94, 188, 282, 376, 470, 564, 658 mm. Měřen byl hořák v konstrukčním provedení dvě a tři, jež jsou specifikovány v kapitole 4.6 a 4.6. Z měření spotřeby plynu a vzduchu byl stanoven výkon hořáku na 4 kW a přebytek vzduchu $n = 1,35$. Naměřené hodnoty jsou sestaveny do tabulky a přiloženy v příloze.

Koncentrace NO

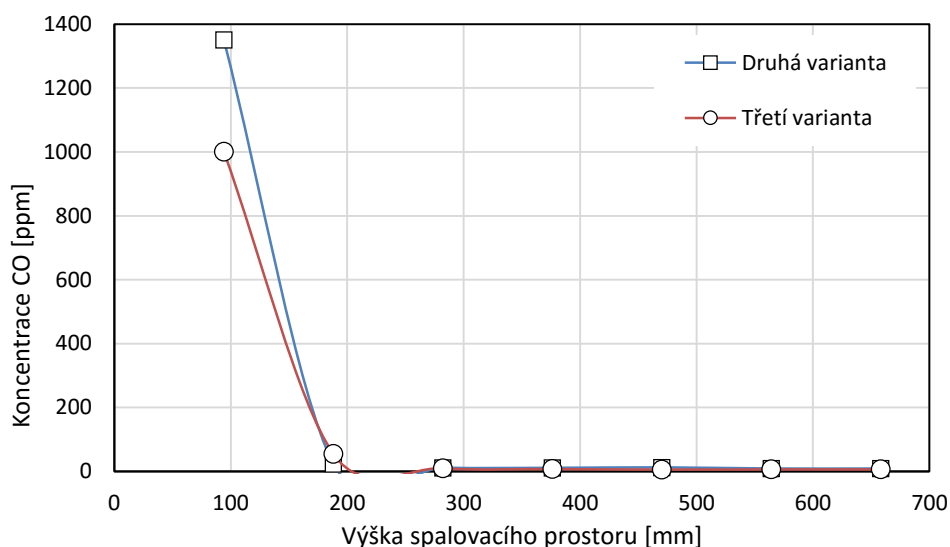
Z grafu 1 je patrné že došlo k průměrnému nárůstu koncentrace NO o 13,25 %. K největšímu nárůstu množství NO došlo během měření mezi výškou 188 mm až 470 mm. Průměrný podíl množství škodlivin NO u druhé konstrukční varianty je 17,6 ppm, pro konstrukční variantu tři to je 31,5 ppm.



Graf 1 Koncentrace NO v závislosti na výšce spalovacího prostoru.

Koncentrace CO

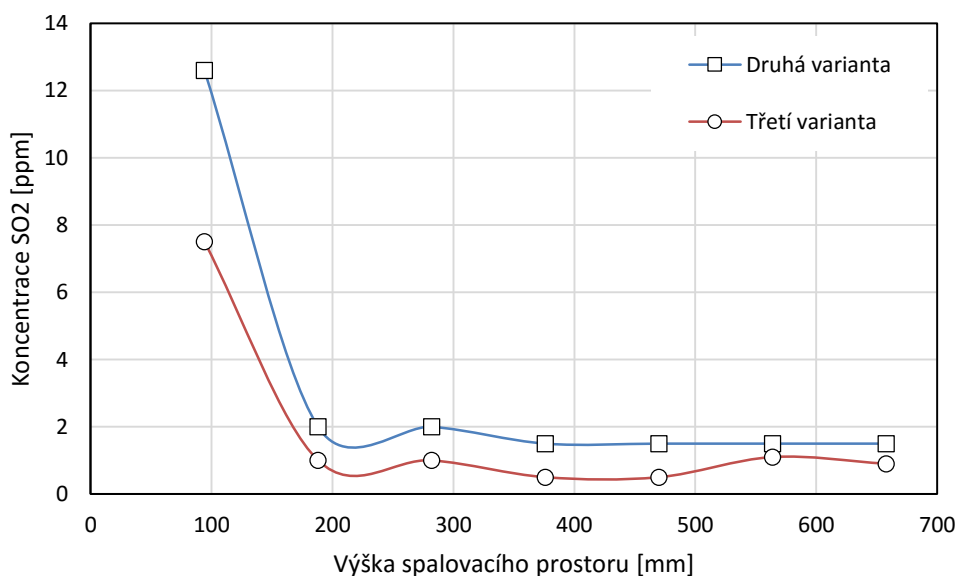
Z grafu 2 je patrné, že v ústí hořáku tj. první měřená výška spalovacího prostoru došlo k nárůstu množství CO o 349 ppm mezi druhou a třetí konstrukční variantou. Následně došlo k prudkému poklesu množství CO u obou měřených variant. U druhé konstrukční varianty je množství CO o minimální rozdíl vyšší.



Graf 2 Koncentrace CO v závislosti na výšce spalovacího prostoru

Koncentrace SO₂

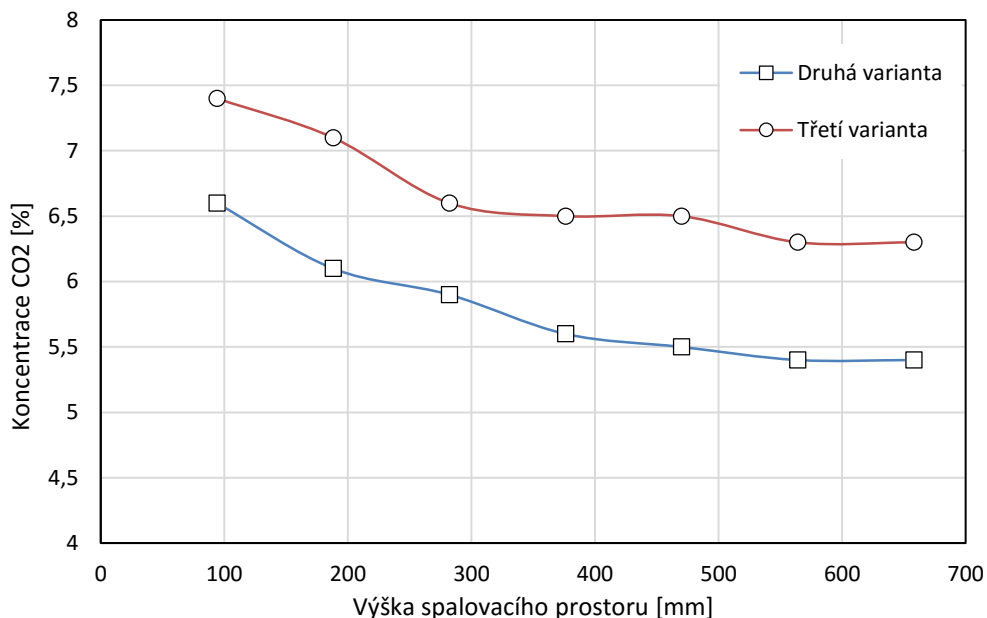
Z grafu 3 je patrné, že došlo k poklesu koncentrace SO₂ po celé výšce spalovacího prostoru u třetí konstrukční varianty. Největší množství škodlivin vzniká v první části spalovací komory tj. do výšky 188 mm. Průměrná hodnota množství SO₂ pro druhou variantu je 3,2 ppm, pro třetí tj. 1,9 ppm.



Graf 3 Koncentrace SO₂ v závislosti na výšce spalovacího prostoru

Koncentrace CO₂

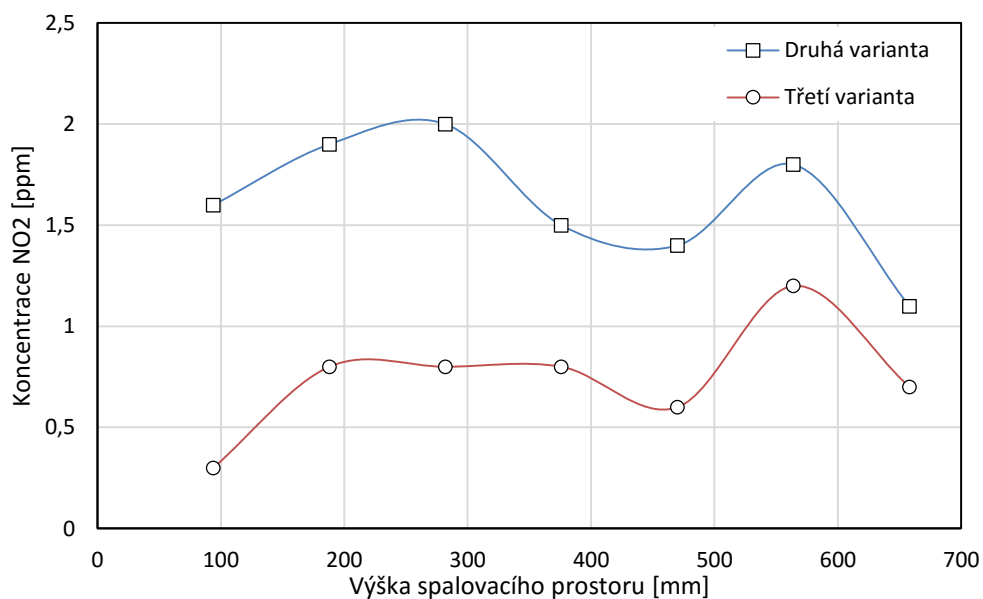
Z grafu 4 je patrné, že procentuální podíl CO₂ je v průměru o 0,95 % vyšší u třetí varianty oproti druhé. Nejvyšší koncentrace vzniká v ústí hořáku tj. okolo 100 mm výšky spalovacího prostoru.



Graf 4 Koncentrace CO₂ v závislosti na výšce spalovacího prostoru

Koncentrace NO₂

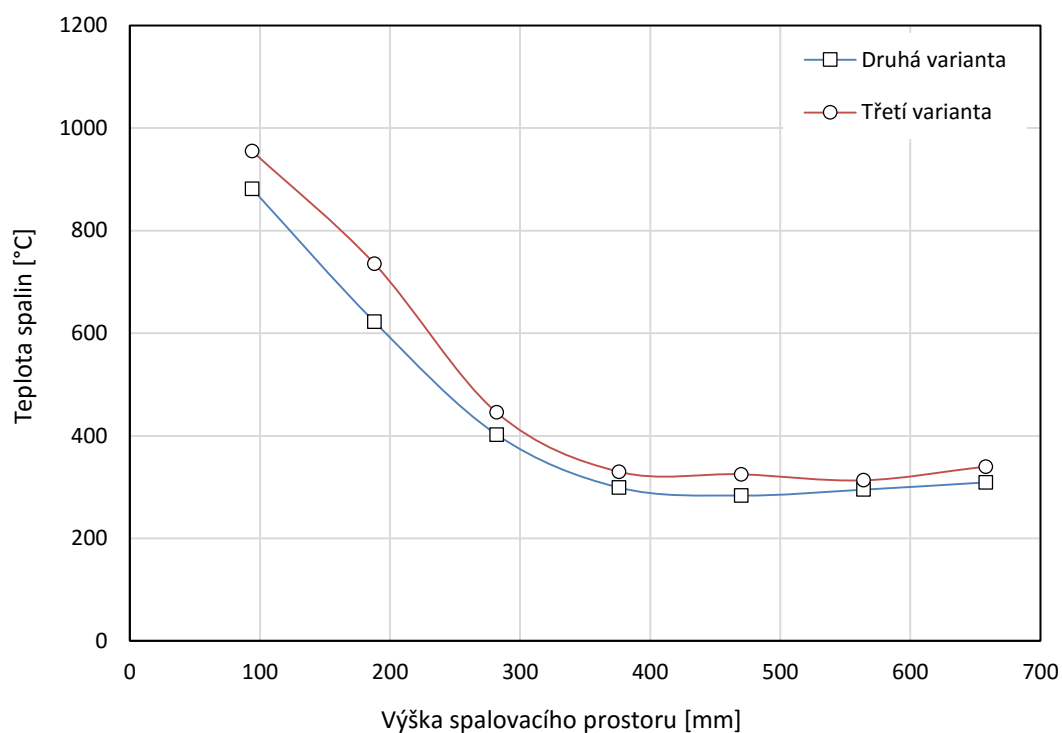
Podíl množství škodlivin NO₂ vychází lépe u třetí varianty. Průměrné množství škodlivin NO₂ u třetí varianty se pohybuje okolo 0,75 ppm. Největší nárůst množství NO₂ je na začátku a na konci spalovacího prostoru.



Graf 5 Koncentrace NO₂ v závislosti na výšce spalovacího prostoru

Teplota spalin

Z grafu 6 je patrné, že teplota spalin je po celé délce spalovacího prostoru vyšší u třetí varianty. Přidáním segmentu do třetí konstrukční varianty došlo ke zvýšení teploty spalin. Toto vede k lepší účinnosti spalovacího zařízení a celkové efektivnosti spalování. K největšímu poklesu teploty dochází mezi výškou spalovacího prostoru 188 – 376 mm.



Graf 6 Závislost teploty spalin na výšce spalovacího prostoru

6. Závěr

Cílem mé diplomové práce byl návrh hořáku a jeho následné experimentální posouzení z hlediska produkce emisí. V první části mé diplomové práce jsem rozebral využití zemního plynu jako zdroje energie, jeho dopravní trasy do České republiky a možnosti těžby zemního plynu. Dále jsem popsal konstrukční varianty hořáků na zemní plyn, jejich problematiku a rozdělení z hlediska přívodu primárního vzduchu a paliva. Následně jsem popsal problematiku týkající se kinetiky a statiky hoření plyných paliv. Popsal jsem vlivy ovlivňující chemickou podstatu hoření plyných paliv a následné chemické reakce vznikající při hoření jednotlivých složek zemního plynu. Vznik emisí a možná opatření pro jejich snížení.

V praktické části jsem stanovoval základní charakteristické výpočty pro jednotlivé druhy zemního plynu. Stechiometrické výpočty a koncentrace jednotlivých složek ve spalínách pro tranzitní zemní plyn. Výpočty pro další druhy zemních plynů jsou uvedeny v příloze. Dále jsem navrhoval tři konstrukční návrhy hořáku, kdy dvě varianty byly podrobeny experimentálnímu měření. V těle hořáku je umístěn víříč spalín, který měl za úkol zlepšit stabilitu hoření a dosažení lepšího tvaru plamene. Lopatky byly pevně umístěné do proudu média. Dalším konstrukčním prvkem v hořáku byla tvarovka plamene umístěná v konstrukční variantě tři. Tvarovka měla za úkol usměrnění směsi okysličovadla a paliva do spalovacího prostoru, čímž ovlivňuje výsledný tvar a rozměry plamene. Tvarovka byla navržena ze žáruvzdorného materiálu, aby byla schopna odolávat vysokým teplotám v okolí plamene. Součástí praktické části bylo experimentální měření, jehož cílem bylo porovnání navržených konstrukčních variant hořáku. Z výsledku měření vyšla nejlépe konstrukční varianta tři, protože došlo, k poklesu koncentrací škodlivin (SO_2 , NO , NO_2) a k nárůstu teploty spalín. Tím jsme dosáhli lepší účinnosti spalovacího zařízení.

Seznam použité literatury

a) odborná texty

- [1] BIENIK, J.: *Ropa, zemný plyn a životné prostredie*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1982. 238 s.
- [2] HYNTOŠOVÁ, H.: *Toky ropy a zemního plynu v Evropě: současná situace a perspektivy*, diplomová práce, Vysoká škola ekonomická Fakulta mezinárodních vztahů
- [3] EVROPSKÝ SOCIÁLNÍ FOND PRAHA & EU: *Využití zemního plynu ve vytápění*, České vysoké učení technické, Praha 2011, 39 s.
- [4] NESIBA, P. *Návrh horizontální spalovací komory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vít Kermes, Ph.D.
- [5] RYCHTER, A. *Návrh spalovací komory 30 kW pro plynná paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Skryja.
- [6] BAUKAL, Charles E. *Heat transfer in industrial combustion*. Boca Raton: CRC Press, c2000, 545 s. ISBN 08-493-1699-5.
- [7] FÍK, J. *Spalování plynných paliv a plynové hořáky*. 1. vyd. Praha: GAS, 1998, 232 s. ISBN 80-861-7601-0.
- [8] BAUKAL, Charles E. *Heat transfer in industrial combustion*. Boca Raton: CRC Press, c2000, 545 s. ISBN 08-493-1699-5.
- [9] Rédr Miroslav, Příhoda Miroslav.: *Základy tepelné techniky*, vyd. SNTL, Praha, 1991, str. 680, ISBN 80-0300366-0
- [10] SVOBODA A.: *Plynárenská příručka: 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě*, vyd. GAS, 1997, str. 1192, ISBN 8090233961
- [11] TOMAN Z.: *Paliva a topné systémy*, 1. vyd. Ostrava: 2013, 60 s. CZ.1.07/2.2.00/28.0304
- [12] BOBÁK, Petr, *Spalování zemního plynu*. Studijní opora předmětu Energie a emise, Únor 2010.
- [13] ZEJDA, V. *Měření rychlostních profilů za vířičem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 83s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vondál, Ph.D.

b) internetové zdroje

- [14] Oiling the World Economy [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.databison.com/oiling-the-world-economy/>
- [15] Břidlicový plyn – Geologie [online]. [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/12371-bridlicovy-plyn-geologie>
- [16] Co když Rusko zavře kohoutek? Kudy do Česka proudí plyn [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/co-kdyz-rusko-zavre-kohoutek-kudy-do-ceska-proudi-plyn.aspx>
- [17] Prodej zdrojů tepla do výkonu 50 kW v ČR v roce 2014 [online]. [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/12848-prodej-zdroju-tepla-o-vykonu-do-50-kw-v-cr-v-roce-2014>
- [18] FÍK, Josef. Hořáky pro spalování zemního plynu. tzbinfo [online]. 2004, říjen [cit. 18. dubna 2008]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2153>
- [19] Spalovací vlastnosti ZP [online]. [cit. 2015-10-11]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1980-spalovaci-vlastnosti-zp-ii>
- [20] Portable Emission Analysis [online]. [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: <http://www.testo350.com/testo-350/350-overview.html>
- [21] Sierra 820 Series [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.sierrainstruments.com/userfiles/file/manuals/IM-820-E1.pdf>
- [22] Co možná nevíte o zemním plynu [online]. [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1908-co-mozna-nevite-o-zemnim-plynu>

Seznam příloh

Výkres druhé a třetí konstrukční varianty hořáku

Stechiometrické výpočty pro další typy zemních plynů

Výsledky experimentálního měření druhé a třetí konstrukční varianty